



ELEKTROMECHANICKÁ ANALÝZA DÉLKOVÉHO A KONTAKTNÍHO ODPORU ELEKTRICKY VODIVÝCH TEXTILNÍCH STRUKTUR

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil
Studijní obor: 3107R007 – Textilní marketing
Autor práce: **Květa Malachová**
Vedoucí práce: Ing. Veronika Šafářová





ELECTROMECHANICAL ANALYSIS OF LENGTH AND CONTACT RESISTANCE OF CONDUCTIVE TEXTILE STRUCTURES

Bachelor thesis

Study programme: B3107 – Textil
Study branch: 3107R007 – Textile marketing - textile marketing
Author: **Květa Malachová**
Supervisor: Ing. Veronika Šafářová



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Květa Malachová**
Osobní číslo: **T11000339**
Studijní program: **B3107 Textil**
Studijní obor: **Textilní marketing**
Název tématu: **Elektromechanická analýza délkového a kontaktního odporu elektricky vodivých textilních struktur**
Zadávající katedra: **Katedra hodnocení textilií**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracujte literární rešerši na téma: a) elektrické vlastnosti technických materiálů, b) základní možnosti přípravy elektricky vodivých textilních struktur, c) kontaktní odpor, d) elektromechanické vlastnosti vybraných textilních materiálů namáhaných tahem.
2. Analyzujte vybranou elektricky vodivou přízi.
3. Navrhněte a realizujte experimentální studii elektromechanické analýzy délkového a kontaktního odporu vodivé příze, studujte: a) závislost elektrického odporu příze na upínací délce délkového textilního útvaru, b) mechanické vlastnosti příze, c) ekvivalentní elektrický odpor vodivé příze, smyčky, řetízku, popř. pleteniny vytvořené vodivou přízí při jednoosém namáhání tahem.
4. Získané výsledky vyhodnoťte, interpretněte a diskutujte vhodnost použití studované příze pro konkrétní aplikace.



Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

PODĚKOVÁNÍ

V této části bych ráda poděkovala své vedoucí bakalářské práce Ing. Veronice Šafářové za spolupráci, vstřícnost, odborné vedení, cenné rady, trpělivost a čas, který mě věnovala. Také bych ráda poděkovala paní Ing. Janě Salačové, Ph.D. za pomoc při tvorbě obrazové analýzy a paní Danuši Steklé.

ANOTACE

Práce se zabývá elektromechanickou analýzou vybrané elektricky vodivé příze za účelem zhodnocení její vhodnosti pro použití jako senzor tahové deformace. Bakalářská práce je rozdělena do dvou částí. První, teoretická a rešeršní část se zabývá elektrickými vlastnostmi textilních materiálů včetně metodiky hodnocení elektrické vodivosti, problematiky kontaktního odporu a změny elektrického odporu při mechanickém namáhání tahem. Zmíněny jsou také způsoby přípravy elektricky vodivých struktur.

Druhá část je věnována experimentální studii elektromechanického chování délkového a kontaktního odporu vodivé příze. Studována byla závislost elektrického odporu příze na upínací délce s vyloučením kontaktních odporů, mechanické vlastnosti příze, ekvivalentní elektrický odpor vodivé příze, smyčky a řetízku při jednoosém namáhání tahem. Výsledky jsou vyhodnoceny a interpretovány a jsou uvedeny možnosti použití studované příze.

KLÍČOVÁ SLOVA:

elektrický odpor, kontaktní odpor, rezistivita vodiče, vodivost, stříbro

ANNOTATION

This work deals with electromechanical analysis of chosen electrical conductive yarn in order to evaluate its suitability for usage like a tensile strain sensor. The work is divided into two parts. First, theoretical and retrieval part deals with the electrical properties of textile materials including methodology of electrical conductivity evaluation, contact resistance questions and changes of electrical resistance during tensile deformation. Methods for preparation of electrically conductive structures are also mentioned. .

Second part is devoted to experimental study of electro-mechanical behavior of longitudinal and contact resistance of conductive yarn. Dependence of electrical resistance on clamping length free of contact resistance, mechanical properties of yarn, equivalent electrical resistance of yarn, overlapped yarns and chain made up of conductive yarn during uniaxial tensile deformation was studied , The results are evaluated and interpreted and possibilities of studied yarn utilization are presented.

KEY WORDS:

electrical resistance, contact resistance, resistivity of a conductor, conductivity, silver

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
ÚVOD.....	10
TEORETICKÁ ČÁST	12
1 Elektrické vlastnosti materiálů	12
1.1 Elektrický odpor vodiče R	13
1.2 Rezistivita vodiče ρ	13
1.3 Vodivost γ	13
1.4 Hodnocení elektrického odporu délkových textilních útvarů	14
1.4.1 Délková rezistivita lineárních textilních útvarů R_L	15
1.4.2 Hmotnostní rezistivita R_S	16
1.5 Kontaktní odpor	17
1.6 Deformace textilních struktur tahem	20
1.6.1 Změna kontaktního odporu textilní struktury při jednoosém namáhání tahem.....	20
1.6.2 Změna elektrického odporu příze při jednoosém namáhání tahem.....	22
1.6.3 Deformace pleteniny tahem.....	24
2 Elektricky vodivé textilie	26
2.1 Vlákná se zlepšenou elektrickou vodivostí.....	27
2.1.1 Kovová vlákna.....	27
2.1.2 Uhlíková vlákna	28
2.1.3 Vlákná z vodivých polymerů	29
2.1.4 Vlákná povrstvená vodivými polymery nebo kovy.....	30
2.1.5 Bikomponentní vlákna	32
EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	33
3 Studovaný materiál.....	33
3.1 Příze Statex - SHIELDEX®	33
3.1.1 Konstrukce příze	34
3.1.2 Vhled příze	36
3.2 Metodika měření	37
3.2.1 Odběr a příprava vzorků.....	37
3.2.2 Podmínky při zkoušce	37
Elektromechanické vlastnosti textilních útvarů se zvýšenou elektrickou vodivostí	7

3.2.3	Měřicí zařízení.....	37
3.3	Hodnocení mechanických vlastností příze.....	39
3.4	Hodnocení elektrických vlastností příze.....	40
3.5	Elektromechanická analýza příze	42
3.5.1	Modifikovaná metodika měření	43
3.5.2	Experiment A: Změna elektrického odporu při jednoosém namáhání příze tahem .	44
3.5.3	Experiment B: Kontaktní odpor dvou vodivých přízí tvořících smyčku.....	47
3.5.4	Experiment C: Kontaktní odpor vodivého háčkovaného řetízku	49
3.5.5	Kontaktní odpor pleteniny.....	52
3.6	Aplikace vodivé příze v inteligentních textiliích.....	52
ZÁVĚR.....		54
SEZNAM LITERATURY.....		56
SEZNAM OBRÁZKŮ		58
SEZNAM TABULEK.....		59
SEZNAM PŘÍLOH		59

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

A	plocha průřezu vodiče [m^2]
a_0	konstantní koeficient
b_0	vyrovnávací koeficient
d	jmenovitý průměr vodiče [m]
D	měrná hmotnost materiálu [kg/m^3]
F	tahová síla [N]
H	tvrdost materiálu [$\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$]
I	elektrický proud [A]
K	konstanta úměrnosti nazývaná K-faktor [-]
l	délka [m]
l_0	počáteční délka vzorku, zvaná upínací délka [m]
L	vzdálenost mezi konci vzorku při měření hmotnostní rezistivity [cm]
N	počet konců vláken nebo příze [-]
N_s	normálová síla v místě překryvu přízí [N]
n	počet kontaktních bodů [-]
P	kontaktní tlak mezi vodivými přízemi [N]
P_0	počáteční kontaktní tlak [N]
P_s	poměrná pevnost [$\text{N}\cdot\text{tex}^{-1}$]
S	plocha průřezu vzorku [m^2]
S_0	počáteční plocha příčného řezu [m^2]
R	elektrický odpor vodiče [Ω]
R_0	počáteční elektrický odpor útvaru [Ω]
R_K	kontaktní odpor [Ω]
R_L	délkový odpor [$\Omega\cdot\text{m}^{-1}$]
R_S	hmotnostní rezistivita [$\Omega\cdot\text{kg}/\text{m}^2$]
R_T	celkový odpor [Ω]
T	jemnost příze [tex]
U	napětí [V]
w	celkový počet vodivých oček v pletenině [-]
ρ	měrný elektrický odpor [$\Omega\cdot\text{m}$]
γ	vodivost [S/m]
σ	napětí [Pa]
ΔR	změna odporu vyvolaná deformací útvaru [Ω]
ε	tažnost (deformace do přetrhu) [%]

ÚVOD

Textilie jsou jedním z nejstarších materiálů známým lidstvu. Oblečení už od dávnověku hraje roli naší druhé kůže. Od počátku oděvy plnily funkční, v podstatě ochrannou a izolační, stejně jako kulturní roli. Oblečení chrání kůži od vnějších nepříznivých vlivů okolního prostředí, umožňuje nám změnit vzhled, vyjadřovat společenský status atd. V dnešní době se pole jeho působnosti rozšířilo dále za tyto role. Dnes se textilní věda a technologie stávají dynamicky interagující.

Zatímco neexistuje plnohodnotná náhrada textilií v oblasti odívání a bytového vybavení, textilie a textilní kompozity jsou přeurčeny k tomu, aby nahradily plastové a kovové součásti v dnešní době používané např. v automobilovém průmyslu, stavebnictví, strojírenství, elektronice, elektrotechnice, medicíně a mnoha dalších oblastech.

Dnešní společnost stále více závisí na všudypřítomné elektronice. V každodenním životě se pro nás stává samozřejmostí okamžitý přístup k jakékoli informaci na jakémkoli místě. Jsme obklopeni mnoha elektronickými zařízeními, jako jsou mobilní telefony, kapesní počítače, notebooky a MP3 přehrávače, které jsou více či méně objemné a ne tak docela vhodné k nošení na těle. Budoucnost se jeví v elektronických systémech, které budou nenápadně začleněny do našeho každodenního oděvu. Tohoto je možno docílit použitím elektricky vodivých textilních struktur při zachování komfortních vlastností známých z klasických textilií. Textilie se zvýšenou elektrickou vodivostí je možno využít pro antistatické účely, pro odstínění elektromagnetického pole, sledování deformace či teploty.

Použití elektricky vodivých textilních struktur pro tvorbu senzorů, které jsou schopny reagovat na vnější mechanické působení změnou elektrického odporu, představuje další konkrétní využití např. při sledování dýchání či pulsu lidského těla, nebo pro další technické aplikace (čidlo pro diagnostiku poruch, deformační tlakoměr, atp.). Jako senzor můžeme označit zařízení, které měří určitou fyzikální nebo technickou veličinu a převádí ji na signál, které lze dálkově přenášet a dále zpracovávat v měřících a řídicích systémech. Nejčastěji se jedná o převádění neelektrických fyzikálních nebo chemických veličin na elektrické signály. Pasivní elektrotechnická součástka používaná k nepřímému měření mechanického napětí prostřednictvím měření její deformace se nazývá odporový tenzometr. Kovové tenzometry je dále možno rozlišit na drátkové a foliové, přičemž v obou případech
Elektromechanické vlastnosti textilních útvarů se zvýšenou elektrickou vodivostí

je jako vodič použit drátek. Vysoká tuhost běžně používaných senzorů však představuje výraznou nevýhodu pro použití např. v oděvním průmyslu. Nahrazení kovových drátků vodivými vlákny či přízemi se proto jeví jako perspektivní.

Cílem této práce je analyzovat a následně prostudovat elektricky vodivou přízi z hlediska její vhodnosti pro použití jako senzor tahové deformace. Příze se zvýšenou vodivostí byla studována zejména dle elektrické vodivosti, mechanických vlastností a následně s ohledem na elektromechanické vlastnosti, které jsou pro tvorbu senzorů tahové deformace stěžejní.

Bakalářská práce je rozdělena do dvou hlavních celků. Obsahuje teoretickou a experimentální část. Teoretická část představuje základní elektrické vlastnosti materiálů včetně metodiky hodnocení elektrické vodivosti. Zvýšená pozornost je věnována kontaktnímu odporu a změně elektrického odporu při namáhání příze a dalších textilních struktur při deformaci tahem. Poté následuje popis možností tvorby elektricky vodivých textilií. V rámci experimentální části bakalářské práce je nejprve zvolena potenciálně vhodná elektricky vodivá příze pro tvorbu textilních senzorů. Příze je následně charakterizována jak z hlediska materiálového složení, tak z hlediska struktury a určeny jsou její základní parametry. Následně je tato příze studována jak z hlediska její elektrické vodivosti prostřednictvím měření závislosti elektrického odporu na upínací délce, tak z hlediska mechanických vlastností. Nemalá část práce je věnována také průzkumu elektromechanických vlastností, a to prostřednictvím sledování změny elektrického odporu při deformaci příze a struktur z příze vytvořených (smyčka, řetízek) tahem.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Elektrické vlastnosti materiálů

Jestliže, jsou látky umístěné v elektrickém poli, může dojít k těmto mezním jevům:

- a) transport elektricky nabytých částic – vzniká elektrický proud doprovázený rozptylem energie, což je typické pro vodiče;
- b) vznik dipólů a indukovaných dipólů doprovázený akumulací energie, tento proces je vratný a typický pro izolátory (dielektrika).

Většina textilních vláken patří mezi elektrické izolátory. To je způsobeno skutečností, že všechny elektrony jsou vázané k atomovým jádrům nebo sdílné v kovalentních vazbách. Jejich elektrická vodivost však není zcela nulová a závisí na obsahu různých přísad, respektive obsahu vlhkosti ve vláknech. Bylo experimentálně ověřeno, že pro hydrofilní polymery postačuje 1% obsah vlhkosti, aby jejich vodivost vzrostla o 8-10 řádů [1].

Hodnota elektrického odporu je dána materiálem, tvarem i teplotou vodiče. Velikost odporu závisí přímo úměrně na délce vodiče a materiálu charakterizovaném měrným elektrickým odporem, nepřímo úměrně na obsahu průřezu vodiče a na teplotě.

Na teplotě závisí odpor vodičů i polovodičů. Odpor vodičů se vzrůstající teplotou stoupá (kladný teplotní součinitel elektrického odporu), kdežto odpor polovodičů, uhlíku a některých speciálních slitin kovů se vzrůstající teplotou klesá (záporný teplotní součinitel elektrického odporu). Elektrický odpor má vždy kladnou hodnotu. Dobré vodiče kladou malý odpor, špatné vodiče kladou velký odpor. Převrácená hodnota elektrického odporu je fyzikální veličina, která se nazývá elektrická vodivost [2].

Je-li vodič dostatečně ochlazován (tj. jeho teplotu je možné považovat za konstantní) zjistíme, že proud procházející vodičem je přímo úměrný napětí mezi jeho konci: $I \approx U$. Tento poznatek objevil v roce německý fyzik Georg Simon Ohm (1787 – 1854), na jehož počest se nazývá Ohmův zákon [3].

1.1 Elektrický odpor vodiče R

Elektrický odpor vodiče R , neboli rezistance, udává vztah mezi proudem I a napětím U mezi koncovými průřezy vodiče. Hlavní jednotou elektrického odporu je ohm $[\Omega]$ definovaný Ohmovým zákonem [4]:

$$R = \frac{U}{I}, \quad (1)$$

kde R je rezistance vodiče $[\Omega]$, I je elektrický proud $[A]$, U je elektrické napětí $[V]$.

Pro rezistanci R drátu či vlákna (kruhového průřezu) délky l platí [1]:

$$R = \frac{l \cdot \rho}{A} = \frac{4 \cdot l \cdot \rho}{\pi \cdot d^2}, \quad (2)$$

kde l je délka vodiče $[m]$, ρ je elektrická rezistivita (neboli měrný či specifický odpor) vodiče $[\Omega \cdot m]$, A je plocha průřezu vodiče $[m^2]$, d je jmenovitý průměr vodiče $[m]$.

Pro materiály upravené vodivým nánosem je plocha průřezu modifikována exponentem k a rovnice (2) potom získá tvar:

$$R = \rho \frac{l}{A^k}. \quad (3)$$

Pokud je součinitel $k = 1$, elektrický odpor je tedy přímo úměrný délce l a nepřímo úměrný ploše příčného řezu.

1.2 Rezistivita vodiče ρ

Rezistivita vodiče neboli měrný elektrický odpor nebo také specifický elektrický odpor je veličina vyjadřující velikost elektrického odporu vodiče s jednotným obsahem průřezu (1 m^2) na jednotku délky (1 m). Měrný odpor (rezistivita) ρ je materiálová konstanta charakterizující elektrickou vodivost látky, pro kterou platí:

$$\rho = \frac{R \cdot A}{l} = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot R}{4 \cdot l}. \quad (4)$$

Vyjadřuje se v ohmmeterech $[\Omega \cdot m]$. Rezistivita je převrácenou hodnotou konduktivity (měrné vodivosti).

Rezistivita mědi se pohybuje kolem $0,0171 \text{ } \Omega [\text{mm}^2 \cdot \text{m}]$, a díky tomu je měď jedním z nejlepších vodičů elektrického proudu (zaostává těsně za čistým stříbrem) [4].

1.3 Vodivost γ

Elektrická vodivost γ vyjádřená v $[S/m]$, neboli měrná vodivost je mírou schopnosti materiálu vést elektrický proud. Je reciprokou (inverzní) hodnotou specifického odporu:

$$\sigma = \frac{1}{\rho}. \quad (5)$$

Podle elektrického měrného odporu se látky dělí na: vodiče ($\rho = 10^{-8} - 10^{-2} \Omega.m$), polovodiče ($\rho = 10^{-2} - 10^0 \Omega.m$), nevodiče ($\rho = 10^0 - 10^{16} \Omega.m$).

Klasická syntetická vlákna mají měrný elektrický odpor ($\rho = 10^{12} - 10^{14} \Omega.m$), antistatická vlákna mají měrný elektrický odpor ($\rho = 10^6 - 10^{10} \Omega.m$). Elektricky vodivá vlákna mají měrný elektrický odpor kolem ($\rho = 10^{-5} \Omega.m$) nebo nižší.

Charakteristikou izolantů a polovodičů je, že jejich vodivost s rostoucí teplotou roste, zatímco elektrická vodivost kovových materiálů se vzrůstající teplotou klesá. Elektrickou vodivost pozitivně ovlivňuje také přítomnost vlhkosti. Co se týče hydrofilních vláken, je elektrická vodivost silně závislá na obsahu vlhkosti. Pro hydrofilní polymery postačuje 1% obsah vlhkosti, aby jejich vodivost vzrostla o 8-10 řádů. Jak je patrné z tabulky č. 1, textilní materiály vykazují vysoký měrný odpor ρ .

Tabulka 1: Měrný elektrický odpor ρ [$\Omega.m$] při 65 % relativní vlhkosti a 20°C [1].

Vlákno	CO	WO	CV	SE	PA6	PA6.6	PAN	PES	PP
$\ln(\rho)$	5,6	7,3	5,8	8,7	13	11	14	17	12,5

1.4 Hodnocení elektrického odporu délkových textilních útvarů

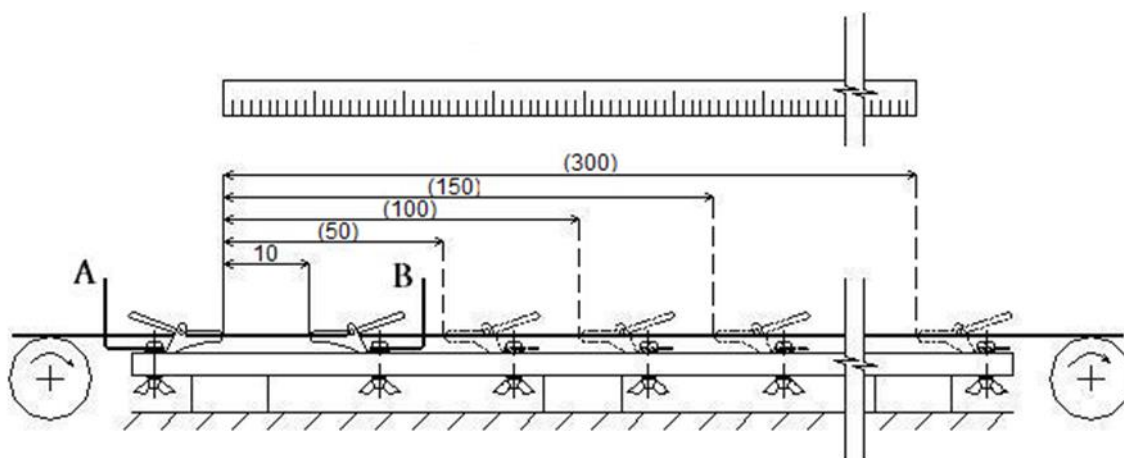
Znalost elektrických vlastností textilního materiálu např. ve formě vlákna či příze prostřednictvím měření elektrického odporu je velmi důležitá, to zejména pro využití za účelem předpovědi elektrické vodivosti celého systému „vlákno – příze – textilie“ a následného návrhu výrobku pro konkrétní aplikaci [4].

Elektrické vlastnosti materiálu se nejčastěji hodnotí dle měrného odporu. Pro délkové textilní útvary (vlákna, příze) je vhodnější založit definici na upínací délce (délková rezistivita), resp. na jemnosti příze (hmotnostní rezistivita). Pro vyjádření veličin je nutná znalost velikosti elektrického odporu na definovaném úseku délkového útvaru, kterou je možno zjistit experimentálně [4].

Pro měření elektrického odporu délkových textilních útvarů se nejčastěji používá dvou vodičová metoda, která je zobrazená na obrázku 1. Nejběžnější je k upnutí přízí (vláken) používáno kovových svorek. Nepříliš obvyklá je tvorba kontaktu pomocí vodivého nátěru či lepení. Přípravek pro měření obsahuje nosnou desku, k níž jsou s nastavitelnou vzájemnou vzdáleností upevnitelné alespoň dva elektrické kontakty, které

jsou současně upínacími prostředky měřeného délkového útvaru. Elektrické kontakty jsou ve tvaru svorek a jejich vzdálenost je nastavitelná. Měřený materiál se upne do elektrodového systému pomocí kovových svorek a měří se elektrický odpor mezi elektrodami. Pomocí postupné změny upínací délky vzorku se proměří závislost elektrického odporu na délce útvaru. Problém vytváří kontaktní odpor na rozhraní měřeného materiálu a kovové svorky. Pokud je to možné, je materiál svorek volen tak, aby hodnota elektrického odporu přechodových kontaktů byla zanedbatelná vůči měřenému materiálu [4].

Měření elektrického odporu se provádí při normalizovaných klimatických podmínkách, především je kladený důraz na teplotu a vlhkost vzduchu.



Obrázek 1: Schematický náčrt přípravku pro měření elektrického odporu délkových textilií [4].

1.4.1 Délková rezistivita lineárních textilních útvarů R_L

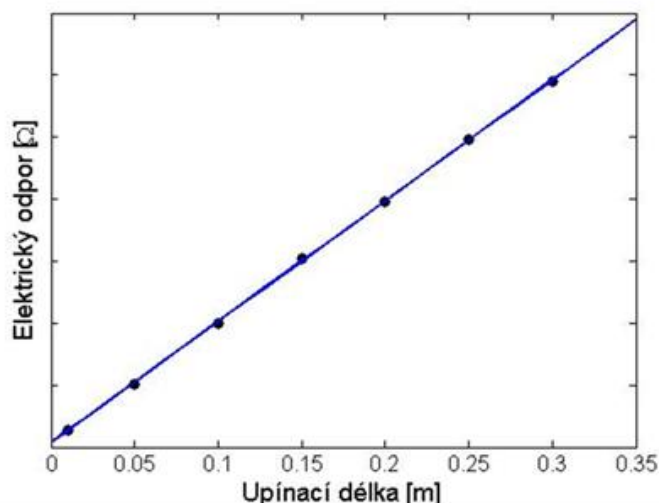
Poměr rezistence mezi konci délkového útvaru a jeho délky se nazývá délková rezistivita lineárních útvarů. Platí:

$$R_L = \frac{R}{l}, \quad (6)$$

kde R je elektrický odpor délkové textilie [Ω], l je délka vodiče [m]. Hlavní jednotkou je [Ω/m] [4].

Jak je patrné ze vztahu (6), závislost na délce je lineární. Směrnice této přímky představuje délkový odpor R_L a průsečík se svislou osou udává kontaktní odpor R_K :

$$R = R_L \cdot l + \Delta R_K, \quad (7)$$



Obrázek 2: Závislost elektrického odporu na upínací délce vzorku [15].

Na obrázku 2 je zobrazen tvar závislosti elektrického odporu na upínací délce vzorku [15]. Kontaktní odpor R_K je označován jako poměr rozdílu elektrického potenciálu (napětí) mezi dotýkajícími se plochami k intenzitě proudu, který kontakty prochází. Je závislý na materiálu kontaktů, působícím tlaku, nerovnosti ploch kontaktů, čistotě kontaktů (oxidace atmosféry), atd.

1.4.2 Hmotnostní rezistivita R_S

Hmotnostní rezistivita neboli hmotnostní specifický odpor je veličina vyjadřující elektrický odpor mezi konci vzorku, s délkou 1 m, hmotností 1 kg a hlavní jednotkou je $[\Omega \cdot \text{kg}/\text{m}^2]$. Vztah mezi hmotnostní rezistivitou a rezistivitou je následující:

$$R_S = \rho \cdot D, \quad (8)$$

kde D je měrná hmotnost materiálu $[\text{kg}/\text{m}^3]$ [4].

Výhodnější je vyjádřit hmotnostní rezistivitu R_S v $[\Omega \cdot \text{g}/\text{cm}^2]$. V tomto případě je elektrický odpor R vzorků vyjádřen následujícím vztahem:

$$R = R_S \cdot \frac{1}{N \cdot T} \cdot 10^5, \quad (9)$$

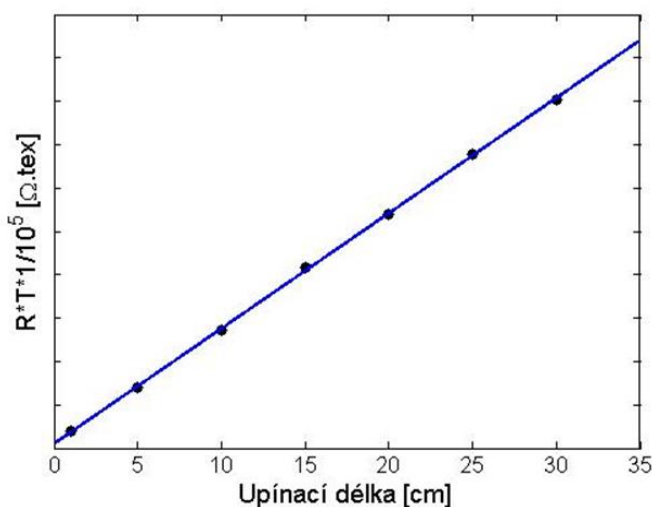
kde l je vzdálenost mezi konci vzorku $[\text{cm}]$, N je počet konců vlákna nebo příze a T je jemnost příze nebo vlákna $[\text{tex}]$ [4].

Hmotnostní rezistivitu R_S $[\text{g} \cdot \Omega / \text{cm}^2]$ pro konstantní délku vzorku je možno vypočíst ze vztahu:

$$R_S = \frac{R \cdot N \cdot T}{l} \cdot 10^{-5}. \quad (10)$$

Jak je zřejmé ze vztahu (10), závislost naměřené rezistence na upínací délce je lineární, přímo úměrná elektrickému odporu, jemnosti příze a počtu konců délkového útvaru a nepřímo úměrná upínací délce. Po vynesení závislosti součinu elektrického odporu a konstant vodiče na délce lineárního útvaru v [cm] je možno ze směrnice přímky odečíst hmotnostní rezistivitu R_S . Úsek, který závislost vytíná na ose y, vymezuje kontaktní odpor. Závislost rezistence na upínací délce je patrná z obrázku 3 a lze ji popsat pomocí rovnice:

$$R \cdot T \cdot N \cdot 10^{-5} = R_S \cdot l + R_K. \quad (11)$$



Obrázek 3: Závislost součinu elektrického odporu, počtů konců příze, jemnosti příze a konstanty na upínací délce [15].

Hmotnostní rezistivitu R_S je také možno vyjádřit pomocí délkové rezistivity R_L [Ω/m]. Po dosazení vztahu (6) do vztahu (10) platí [15]:

$$R_S = R_L \cdot N \cdot T \cdot 10^{-7}. \quad (12)$$

1.5 Kontaktní odpor

Jak bylo zmíněno výše, kontaktní odpor vznikající na rozhraní kovové svorky a měřeného materiálu způsobuje při hodnocení elektrického odporu chybu měření. Při styku kontaktu prochází elektrický proud z jedné části kontaktu do druhé. Protože oba materiály nejsou zcela hladké, styk neprobíhá po celé ploše kontaktu, ale jen v několika malých ploškách. Tím je přechod proudu omezen a projevuje se jako přechodový odpor kontaktu neboli kontaktní odpor. Velikost přechodového odporu závisí na kvalitě povrchu styčných ploch kontaktů a na síle, kterou jsou kontakty vzájemně přitlačovány (čím větší síla, tím

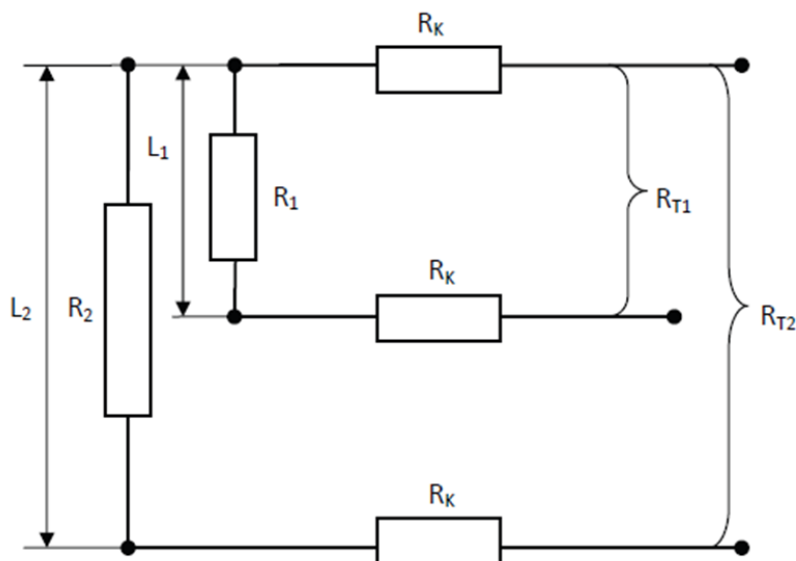
větší jsou vodivě spojené plošky a tím i menší kontaktní odpor), dále závisí na vodivosti povrchu styčných ploch, protože na povrchu kovů vzniká vrstva oxidu, která může být polovodivá až nevodivá

Kontaktní odpor vzniká v místě styku měřeného vzorku a přípojek elektrického obvodu a je dán poměrem rozdílu potencionálů dotýkajících se ploch a intenzity proudu protékajícím kontaktem. Z důvodu požadavku na přesnost měření nelze tuto hodnotu odporu zanedbat a to z několika příčin:

- plochy kontaktního odporu závisí na nerovnostech dotykových ploch. Plochy kontaktu nebývají vždy hladké, z toho důvodu se nedotýkají ve všech bodech.
- plochy kontaktního odporu nebývají ideálně čisté, mnohdy jsou pokryty vrstvou kysličníku, jejíž vodivost je nepatrná.
- kontaktní odpor je také velice závislý na tlaku.

Důsledkem je vznik chyb, tím je snižovaná přesnost jednotlivých měření a reprodukovatelnost měření. Z toho důvodu je nutné kontaktní odpor z měření vyloučit [12].

Problematika kontaktních odporů a možnosti jejich eliminace je řešena v práci [13]. Metodikou měření je dosaženo eliminace kontaktního odporu při hodnocení délkových textilních útvarů z hlediska jejich elektrické vodivosti. Každý měřený úsek příze je zatížen chybou, kterou způsobují dva kontaktní odpory v místě upnutí vzorku v elektrodovém systému. Na obrázku 4 je schéma, které popisuje, problematiku elektrického odporu zatíženého kontaktními odpory. Elektrický odpor je pomocí nové metodiky experimentálně měřen na úseku délkového textilního útvaru o délce L_1 . Tento odpor je označen R_{T1} a jedná se o celkový odpor úseku příze L_1 , včetně sumy kontaktních odporů. Následně je experimentálně změřen úsek příze o délce L_2 . Tato hodnota elektrického odporu je označena R_{T2} a jedná se o celkový odpor úseku příze L_2 vč. sumy kontaktních odporů [13].



Obrázek 4: Schematický náčrtek odpovídajícího elektrického obvodu reprezentující měření elektrického odporu délkových textilních útvarů [13].

Za předpokladu lineárního vzrůstu elektrického odporu v závislosti na délce vzorku platí:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{L_2}{L_1}, \text{ odtud} \quad (13)$$

$$R_2 = \frac{L_2}{L_1} \cdot R_1. \quad (14)$$

Dále platí, že:

$$R_1 + 2R_K = R_{T1} \quad (15)$$

a

$$R_1 + 2R_K = R_{T2} \quad (16)$$

Potom z rozdílu rovnic (15), (16) platí:

$$R_2 + R_1 = R_{T2} - R_{T1}. \quad (17)$$

Po dosazení vztahu (14) do (17) platí:

$$R_{T2} - R_{T1} = \frac{L_2}{L_1} \cdot R_1 - R_1 = \left(\frac{L_2}{L_1} - 1 \right) \cdot R_1. \quad (18)$$

Po úpravě vztahu (18) platí, že:

$$R_1 = \frac{R_{T2} - R_{T1}}{\frac{L_2}{L_1} - 1}. \quad (19)$$

Jsou-li vzdálenosti mezi sousedícími kontakty stejné, platí pro měřené délky L_1 a L_2 :

$$L_2 = 2 \cdot L_1. \quad (20)$$

Po dosazení (20) do vztahu (19) platí pro velikost odporu R_I zkoušeného vzorku bez kontaktních odporů R_K .

$$R_1 = R_{T2} - R_{T1}. \quad (21)$$

Jak bylo popsáno výše, kontaktní odpor můžeme pozorovat v nejjednodušším případě na styku ploch elektrod a pevného měřeného materiálu. V případě relativně komplikovaných textilních struktur (tkanin, pletenin, netkaných textilií) můžeme pozorovat kontaktní odpor také na styku vláken, resp. přízí.

Dle teorie kontaktního odporu [8] pro kontaktní odpor R_K platí:

$$R_K = \frac{\rho}{2} \sqrt{\frac{\pi \cdot H}{n \cdot P}}, \quad (22)$$

kde ρ [$\Omega \cdot m$] je elektrický odpor, H [$N \cdot mm^2$] tvrdost materiálu, n je počet kontaktních bodů a P [N] kontaktní tlak mezi vodivými přízemi [13].

Tvrdost materiálu a elektrický odpor jsou konstanty, které závisí na vlastnosti materiálu. Kontaktní odpor je proto nepřímo úměrný počtu kontaktních bodů a kontaktnímu tlaku.

1.6 Deformace textilních struktur tahem

1.6.1 Změna kontaktního odporu textilní struktury při jednoosém namáhání tahem

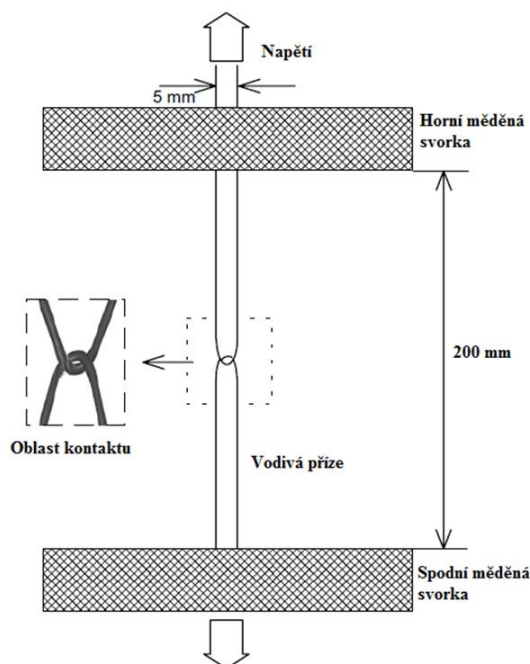
Při jednoosém namáhání vodivých textilií tahem se výpočet ekvivalentního elektrického odporu stává komplikovanější v důsledku prodloužení přízí při mechanickém namáhání a zvýšení napětí v oblasti smyček, což snižuje kontaktní odpor. Celkový odpor by tedy mohl být rozložen na délkový odpor R_L a kontaktní odpor R_K . Vodivá příze je charakterizovaná délkovým odporem, zatímco dvě příze tvořící smyčku např. v pletenině jsou tvořeny jak délkovým odporem, tak kontaktním odporem [8].

Kontaktní odpor může být stanoven experimentálně. Uskupení experimentu pro hodnocení kontaktního odporu a kontaktní síly je znázorněno na obrázku 5. Z provedených experimentů zveřejněných v odborné knize [12] je zřejmé, kontaktní odpor se snižuje se zvyšující působící silou. To je patrné i z obrázku 6.

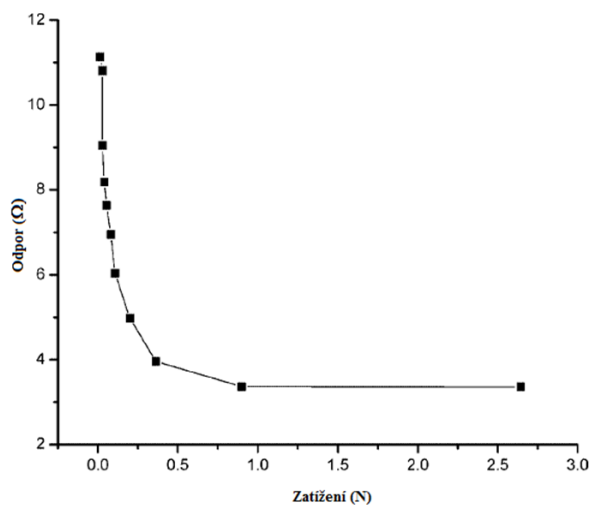
Vztah mezi normálovou silou smyčky tvořené dvěma přízemi a kontaktním odporem může být popsán následující funkcí [12]:

$$R_c = f(N_s), \quad (23)$$

kde funkce f je určena experimentálně a N_s je normálová síla v místě překryvu přízí.



Obrázek 5: Seskupení experimentu pro zjišťování kontaktního odporu [12].



Obrázek 6: Změna kontaktního odporu při zatížení příze [12].

Kontaktní odpor vodivých přízí, které jsou vzájemně v kontaktu, ovlivňuje jak jejich vzájemný tlak, tak jejich zákrut, který způsobuje torzi rovných paralelně uspořádaných vláken ve směru osy příze.

Kontaktní odpor v místě smyčky tvořené dvěma přízemi klesá se zvyšující se působící silou a tedy nárůstem délky příze nebo textilie. Vztah mezi tahovou silou F a kontaktním tlakem P , popisuje následující rovnice [8]:

$$P = P_0 + a_0 F, \quad (24)$$

kde P_0 představuje počáteční kontaktní tlak v klidu a a_0 konstantní koeficient. Protože je kontaktní odpor R_K nepřímo úměrný kontaktnímu tlaku P viz rovnice (24), výsledná rovnice získá tvar [8]:

$$R_K \sim \frac{1}{\sqrt{P}} = \frac{1}{\sqrt{P_0 + a_0 F}} = g(F). \quad (25)$$

Proto je nutné, aby mocnina P odrážela odpor vyplývající ze zakroucení příze. Modelovou rovnicí pro kontaktní odpor je [8]:

$$R_K = \frac{a_1}{P_0 a_0 F}. \quad (26)$$

1.6.2 Změna elektrického odporu příze při jednoosém namáhání tahem

Základním režimem namáhání je jednoosá deformace v tahu. Působí-li na lineární textilní útvar postupně rostoucí síla, dochází k růstu prodloužení až do bodu přetrhu. Charakteristickými hodnotami pracovního diagramu je počáteční modul a souřadnice bodu přetrhu jsou označovány jako pevnost a tažnost. Při jednoosé deformaci tahem se zvětšuje délka vodiče, zmenšuje průměr a dle použitého materiálu se mění i jeho měrný elektrický odpor. U kovových materiálů je měrný odpor prakticky nezávislý na deformaci, tedy veličina ρ je konstantní. Na změny odporu kovového délkového vodiče pak mají vliv pouze jeho rozměry.

Pevnost v tahu je odezva materiálu při namáhání v tahu. Pod pojmem napětí σ [Pa] rozumíme absolutní sílu F [N] přepočítanou na plochu průřezu vzorku S [m²]. Plocha průřezu nitě je obtížně stanovitelná, přepočítává se absolutní síla F [N] na jemnost vzorku T [tex]. Poměr mezi silou do přetrhu a jemností příze se nazývá poměrná pevnost P_s [N.tex⁻¹]. Poměrná pevnost do přetrhu vzorku, je pevnost v tahu. Vztah mezi pevností v tahu a tažností je znázorněn na obrázku 7 [19].

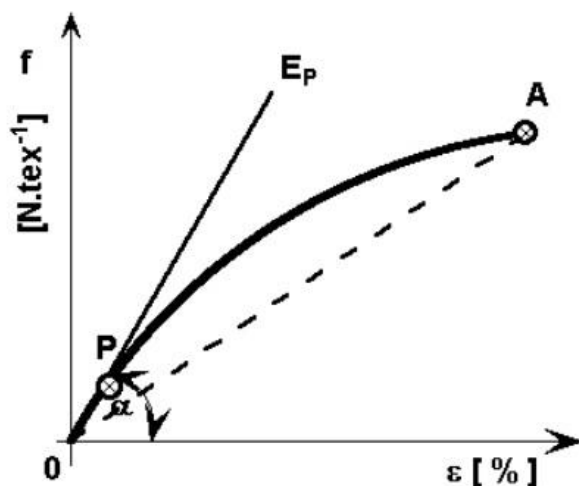
Při natahování vzorku dochází k jeho prodloužení, čili deformaci Δl [mm] [19]:

$$\Delta l = l - l_0, \quad (27)$$

kde l [mm] je konečná délka po natažení a l_0 [mm] je počáteční (původní) délka vzorku, zvaná upínací délka.

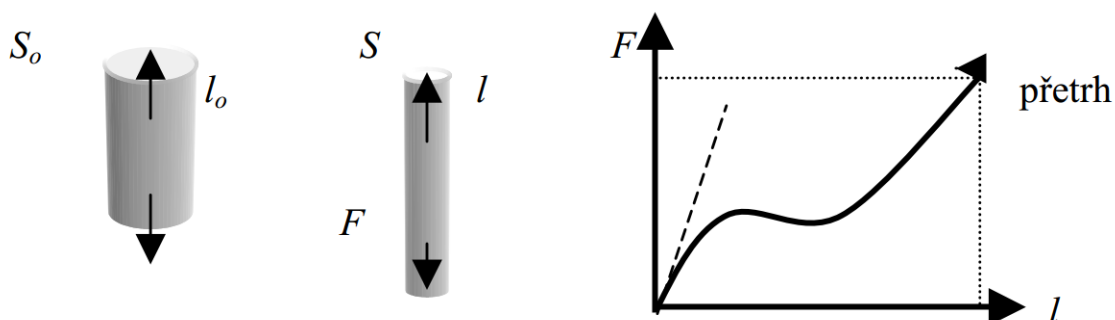
Relativní deformaci do přetrhu nazýváme tažnost ε [%]:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (28)$$



Obrázek 7: Tahová křivka [19].

Na obrázku 8 je pracovní diagram vláken. Vláknem původní délky l_0 a plochy příčného S_0 působením síly F prodlouženo na délku l a zúženo na plochu příčného řezu S . Místo absolutní síly R [N] se používá napětí σ [Pa] [18].



Obrázek 8: Pracovní diagram vláken [18].

Obecně je citlivost senzoru hodnocena dle konstanty K-faktoru. Je-li měřená deformace objektu vyjádřena poměrným prodloužením jeho délky ε ($=\Delta l/l$), pak poměrná změna elektrického odporu kovového délkového je [8]:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = K \cdot \varepsilon, \quad (29)$$

kde R_0 je počáteční elektrický odpor útvaru, ΔR je změna odporu vyvolaná deformací útvaru, K je konstanta úměrnosti nazývána K-faktor, ε je poměrné přetvoření měřeného materiálu [8]. Dále platí:

$$R/R_0 = \frac{(1+\varepsilon)}{(1-\nu\varepsilon)^2} \quad (30)$$

a

$$R = \rho \frac{L_0}{A_0} \frac{(1+\varepsilon)}{(1-\nu\varepsilon)^2}, \quad (31)$$

kde R_0 je počáteční elektrický odpor roven $\rho \cdot l_0 \cdot A_0^{-1}$ a ν je Poissonův poměr.

Protože se plocha průřezu útvaru při namáhání příze tahem (tzn. zvyšováním délky) snižuje, není elektrický odpor vztažený k délce útvaru R_L nadále závislý pouze na délce příze. Délka a plocha příčného řezu příze jsou tedy závislé na působící síle F [N]. Pokud původní délku označíme l_0 platí, pak rovnice (3) může být upravena následovně [8]:

$$R_I = f(F, l_0) = \rho \frac{l(F, l_0)}{A(F, l_0)^k}. \quad (32)$$

Ve skutečnosti je elektrický odpor nelineárně závislý na působící síle F a počáteční délce příze l_0 . Následující vztah zahrnuje vliv n -řádu a vzájemnou korelaci mezi délkou příze a působící tahovou silou na výsledný elektrický odpor délkového útvaru [8]:

$$R_I = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N C_{mn} F^n L_0^m, \quad (33)$$

kde, C_{mn} jsou koeficienty, které mohou být určeny experimentálně.

Kombinací rovnice (26), která pojednává o kontaktním odporu v místě styku dvou přízí tvořících smyčku s rovnicí (31), kde je brán v úvahu odpor konců obou přízí je možno získat ekvivalentní elektrický odpor smyčky tvořené dvěma přízemi [8]:

$$R(f, L_0) = f(f, L_0) + g(F) = \sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N C_{mn} F^n L_0^m + \frac{a}{P_0 a_0 F}. \quad (34)$$

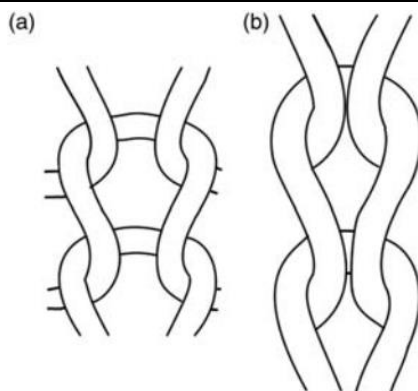
Jak je uvedeno v článku [8], rovnice (34) naznačuje, že kontaktní odpor hraje významnou roli počátečním procesem namáhání textilní struktury tahem a vede ke snížení celkového odporu, zatímco délkový odpor převládá v další fázi natahování. Tento jev bude sledován v rámci experimentální části této bakalářské práce.

1.6.3 Deformace pleteniny tahem

Na napínanou pleteninu působí vyšší síla než na prostý řetízek. Pletená smyčka se skládá z jehelní smyčky, která je tvořena z jehelního obloučku, stěn oka a platinového obloučku. V relaxovaném stavu je smyčka znázorněna na obrázku 8(a) [8].

Při jednoosém namáhání pleteniny tahem, působí tažná síla proti třecí síle, která vzniká v kontaktním místě mezi smyčkou a dochází k pohybu kontaktního místa. Díky tomu se poloměr zakřivení příze v ohybu změní. Dále se může délka platinového obloučku a stěn oka měnit z důvodu pohybu kontaktního místa [8].

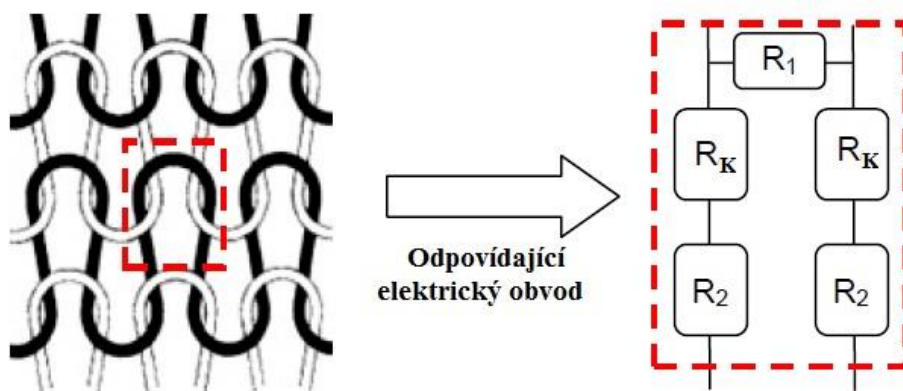
Při tahu se další síla zvyšuje, míra pohybu v kontaktním bodě je omezena a kontaktní tlak mezi jehelním obloučkem a platinovou smyčkou rychle stoupá. Přitom se příze prodlouží díky velké tahové síle, jak je znázorněno na obrázku 9(b) [8].



Obrázek 9: Změna tvaru smyčky – a) smyčka v přirozeném stavu b) smyčka při prodloužení [8].

Elektricky vodivá pletenina může být modelována pomocí elektrického obvodu, jak je znázorněno na obrázku 10. Tento model vychází z následujících předpokladů:

- příze jsou elektricky vodivé a konduktivita je konstantou, tzn., že nezávisí na deformaci,
- elektrická vodivost v místech, kde dochází k provázání přízí je závislá pouze na aplikované normálové síle,
- tření vláken je zanedbatelné [12].



Obrázek 10: Pletená soustava – elektrický obvod představující základní očko pleteniny [17].

Elektrický odpor vodivé pleteniny ve směru sloupků může být modelován superpozicí délkově vztáženého odporu a kontaktního odporu příze délky l . Protože je elektrický odpor nepřímo úměrný celkovému počtu vodivých přízí tvořících sloupky pleteniny, rovnice (23) může být přepsána následovně:

$$R_f(F, L, W) = \frac{1}{W} \left(\sum_{n=0}^N \sum_{m=0}^N C_{mn} F^n L_0^m + \frac{a_i}{P_0 a_0 F} \right) + W \cdot b_0 \quad (35)$$

kde b_0 je kompenzační koeficient odpovědný za koncový odpor vznikající mezi konektorem a textilií v rámci testu. W je celkový počet sloupků pleteniny.

Elektrický odpor vztažený na délku příze, kontaktní odpor vznikající jak na styku elektrody s měřeným materiálem, tak vliv jednoosého namáhání tahem na kontaktní odpor mezi přízemi vznikající ve struktuře textilie bude studován v rámci experimentální části této práce.

2 Elektricky vodivé textilie

Budoucnost chytrých oděvů je v elektrických systémech, které se stanou nedílnou součástí našeho každodenního oděvu. Výsledné výrobky budou muset splňovat řadu požadavků, které spotřebitel bude vyžadovat. Jedním z nich je, že výsledné vodivé textilní výrobky určené pro odívání musí být ohebné a pružné, aby bylo dosaženo vysokého komfortu při nošení, zároveň musí být dostatečně pevné. Dále by měly mít nízkou ohybovou a smykovou tuhost, aby byly snadno deformovatelné a splývavé. Proto by použitá vlákna měla být relativně jemná (1 g/km) a textilie by měly mít nízkou plošnou hmotnost (asi 150 g/m², ne však více jak 300 g/m²) [4].

Kovy, uhlík a vodivé polymery jsou velmi tuhé a křehké materiály. V dnešní době se klade velký význam na vývoj a zpracování těchto vláken. Je známo pět základních metod tvorby elektricky vodivých textilií. Patří sem:

- tvorba plošné textilie z vláken se zvýšenou elektrickou vodivostí. Jedná se o přirozeně vodivá vlákna (kovová, uhlíková), dále vlákna, která jsou speciálně vyvinuta za účelem zvýšení elektrické vodivosti (povrstvení nebo plenění vláken vodivými částicemi),
- povrstvením textilie pomocí vodivé vrstvy, ty tvoří kov nebo vodivý polymer,
- rozptýlením elektricky vodivých částic do připravené textilie. Tato metoda se používá převážně u netkaných textilií. Netkaná textilie je použita jako substrát, do kterého jsou zaneseny vodivé částice (saze, kovy),
- potištění textilií. Elektricky vodivá struktura je vytvořena pomocí tiskařských technik (např. sítotiskem), který je nanesen na nevodivou textilií,

- prošíváním textilie. Vodivost je zajištěna prošitím nevodivé textilie elektricky vodivými nitěmi [4].

2.1 Vlákná se zlepšenou elektrickou vodivostí

Jak je uvedeno výše, většina elektrických materiálů patří mezi elektrické izolanty. Jejich elektrická vodivost však není zcela nulová, závisí na obsahu přísad a také na obsahu vlhkosti. Textilní vlákna obecně dosahují vysokých hodnot rezistivity ρ . Závislost rezistivity na obsahu vlhkosti se využívá pro měření vlhkosti materiálu na textilní bázi [10].

Pro přípravu vláken se zlepšenou elektrickou vodivostí je možno použít řady metod. Mezi standardní patří:

- 1) Použití nekonečných vláken nebo staplových, které jsou zcela vyrobeny z vodivého materiálu (uhlíková vlákna, kovová atd.).
- 2) Příměs vodivých částic (uhlík, kovy) do polymerních roztoků nebo tavenin před zvlákňováním.
- 3) Povrstvování klasických vláken vodivými polymery nebo kovy.
- 4) Polymery, jejichž chemická struktura zajišťuje zvýšenou elektrickou vodivost.
- 5) Zvlákňování bikomponentních vláken s jednou složkou obsahující vodivé příměsi [10].

Mezi vodivá vlákna tedy patří: kovová vlákna, uhlíková vlákna, bikomponentní vlákna a elektricky vodivé polymery.

2.1.1 Kovová vlákna

Jako kovová vlákna je možné označit vlákna vyrobená z kovů, dále kovů potažených plasty, plastů potažených kovy nebo povrchových vrstev kovů, pokrývající celá vlákna. Takováto vlákna byla dříve využívána zejména pro tvorbu antistatických efektů, v dnešní době slouží mimo jiné k přípravě elektricky vodivých struktur.

Kovy jsou díky svým elektromechanickým vlastnostem a nízké ceně zajímavým materiálem pro technické aplikace. Zapracování kovových drátů do textilních struktur je však problematické vzhledem k jejich vysoké ohybové tuhosti [1].

Nejčastěji se pro výrobu drátků do 100 μm se používá techniky tažení (obvykle přes kónické otvory) za studena nebo za tepla. Při tažení za tepla, vhodné pro křehké kovy

(wolfram, molybden), se volí teplota nad teplotou krystalizace. Pro kujné kovy (ocel, měď, zlato, stříbro) se používá tažení za studena. Při tomto tažení dochází také k deformačnímu zpevnění, jehož důsledek je zvýšení pevnosti a snížení kujnosti [1].

Vlastnosti vybraných kovů, které se používají pro výrobu tak jemných drátků, že je lze např. mísit s vlákny nebo použít jako zesílení do kompozit, jsou uvedeny v tabulce č. 2.

Tabulka 2: Vlastnosti vybraných kovů.

Kov	Měrná hmotnost [kg/m ³]	Bod tání [°C]	Modul pružnosti [GPa]	Pevnost [GPa]	Měrná el. vodivost (S.m ⁻¹)
beryllium	1800	1350	310	1,1	$2,5 \cdot 10^7$
měď	8900	2038	125	0,45	$6,07 \cdot 10^7$
wolfram	19300	3410	350	3,82	$1,8 \cdot 10^{-6}$
molybden	10200	2625	330	2,2	$1,73 \cdot 10^7$

Beryllium je kov s extrémně nízkou měrnou hmotností a vysokém počátečním modulu (tuhosti). Problémem je jeho vysoká toxicita, která vyžaduje speciální manipulaci.

Měď se používá pro svou výbornou elektrickou vodivost zejména jako dráty pro elektrické účely. Často se potahuje polymery (polyestery, polyamidy, aramidy) a přidává se (v relativně malém množství) do vlákenných struktur jako vodivá komponenta [1].

2.1.2 Uhlíková vlákna

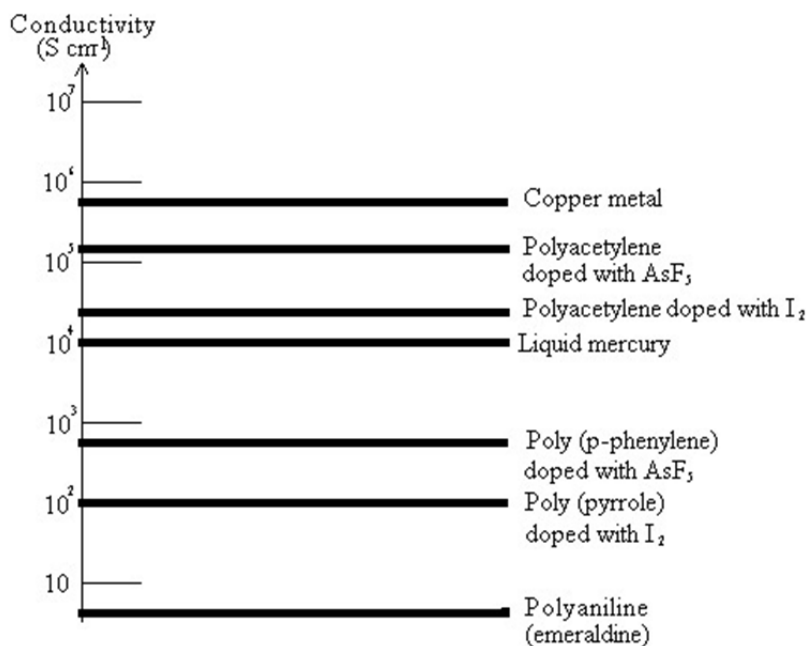
Uhlíková vlákna patří do skupiny vysoko pevnostních materiálů. Za uhlíkové vlákno je označováno vlákno, které obsahuje nejméně 90 % uhlíku získaného kontrolovanou pyrolýzou vhodných vláken. Elektrická vodivost uhlíkových vláken je $1 \cdot 10^5$ S.m⁻¹ [4].

Vlastnosti uhlíkových vláken jsou závislé na výběru výchozího polymerního materiálu, na podmínkách karbonizace, tepelné úpravy a typu přidaných aditiv. Mezi vlastnosti patří vysoká pevnost, dobrá elektrická vodivost, stabilita při vystavení reaktivnímu okolí, nízká hustota, vysoká křehkost, nízký až negativní koeficient tepelné roztažnosti a odolnost vůči tepelným výkyvům.

Uhlíkové materiály se uplatní jako sorpční materiály, materiály odolné vůči elektrostatickému nabíjení, dále jako katalyzátory a vyztužené kompozitní materiály [4].

2.1.3 Vlákná z vodivých polymerů

Vodivé polymery poskytují zajímavou alternativu kovových vláken, to naznačuje i obrázek 11. Do této skupiny patří například polyacetylen (PA), polypyrrol (PPy), polyfthiofen (PTH) a polyanilin (PANI). Tyto polymery jsou pevné (80 – 300 MPa), lehké ($1,5 \text{ g/cm}^3$), pružná (prodloužení je v rozmezí 3 % - 20 %) a jsou vysoce elektricky vodivé (300 – 1000 S/cm) a tudíž jsou vhodné pro tkaní, pletení a další textilní výrobní procesy [4, 12].



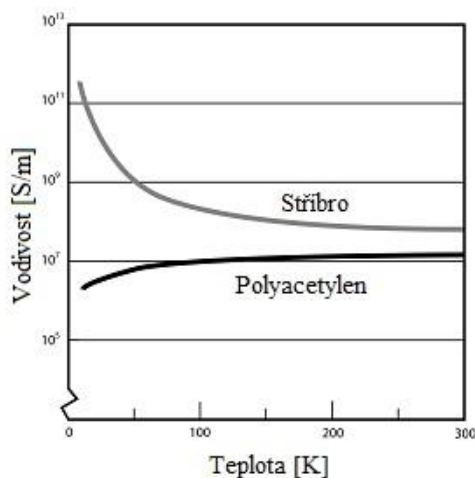
Obrázek 11: Logaritmičká vodivost některých kovů a vodivých polymerů.

Velké množství článků bylo publikováno s využitím polypyrrolu pro povrstvování jak vláken, tak přízí i textilií, a to zejména díky jeho elektrické vodivosti, dobré stabilitě a životnosti výrobku [12].

Klíčovou vlastností vodivých polymerů je pravidelné střídání jednoduchých a dvojných vazeb (konjugace) v molekulární struktuře, které transport po konjugovaném řetězci zprostředkovávají. Strukturně nejjednodušším konjugovaným polymerem je polyacetylen [4].

Výhodou vodivých polymerů je, že možné měnit jejich elektrické vlastnosti v širokém rozsahu a to například dlužením nebo přidávkem rozdílných dopantů. Závislost elektrické vodivosti a teploty je u polymerů rozdílná než u kovů nebo polovodičů. U

kovových materiálů stoupá vodivost s klesající teplotou. Na rozdíl od toho vodivost polovodičů a izolantů klesá se snižující teplotou, jak je znázorněno na obrázku 12.



Obrázek 12: Závislost vodivosti na teplotě pro kovy a vodivé polymery [4].

2.1.4 Vlákná povrstvená vodivými polymery nebo kovy

Elektricky vodivá vlákna mohou být také vytvořena pomocí povrstvování vláken kovy, galvanickými materiály nebo solemi kovů. Výhodou metody povrstvování je vhodnost použití pro velké množství typů vláken a získání dobré vodivosti bez významné změny dosavadních vlastností substrátu jako je měrná hmotnost, flexibilita a omak. Povrstvování je možno aplikovat na povrch vláken, přízí nebo dokonce textilií za účelem vytvoření elektricky vodivých textilních struktur. Nicméně adheze mezi kovem a délkovým textilním útvarem stejně tak jako odolnost vůči korozi mohou způsobovat problémy [4].

Běžné postupy povrstvování textilií zahrnují nanášení kovového prášku pojivy, vakuové pokovování, katodové naprašování a bezproudové elektrolytické nanášení [4].

Postup nazvaný **pokovování s pojivem** je obdobou klasických polymerních nátěrů. Hliníková pasta (65 až 70%) s vysokou schopností odlupování je začleněna do polymerního nosiče jako je syntetický kaučuk, PVC, polyuretany, silikony, pryskyřičné emulze atd. a je nanášena na textilií. Jako metoda nanášení může být použito např. nánosování nožem. Přílnavost, ohyb a chemická odolnost povrstvené textilie závisí na typu použitého polymeru [4].

Při **vakuovém naprašování** je materiál vložen do vakuové komory. Čím nižší je tlak a čistší vakuum, tím lepší je výsledek procesu. Kov se do odpařovacího zdroje dává

v různé formě. Často je zakládán jako smotaný tenký drátek, ve formě malých kuliček, granulí apod. Kov je zahřát na teplotu (obvykle pod bod varu), při níž jeho tlak vodních par překročí zbytkový tlak komory a nastane odpařování kovu. Substrát prochází přes vodou chlazený válec a je vystaven nanášením parou. Pára kondenzuje na povrchu materiálu a mění se v pevnou látku. Kovový film vytvořený touto metodou může velmi tenký, ale je možno vytvořit relativně tlustou vrstvu, pro dosažení vyšší vodivosti (pod $1 \Omega/\text{m}^2$) a vyšší odrazivosti a/nebo neprůhlednosti. Několik kovů může být vakuově odpařováno. Mezi nejběžněji užívané patří hliník, měď, stříbro a zlato [4].

Katodové naprašování je také prováděno ve vakuové komoře obsahující inertní plyn, obvykle argon. Komora obsahuje katodu (terč), která je zdrojem nanášeného materiálu a anodu, která působí jak držák substrátu. Hlavní výhodou tohoto procesu výroby je univerzálnost. Prakticky každý elektricky vodivý kov může být aplikován na velmi široký okruh substrátů za účelem vytvoření vysoce vodivých materiálů (pod $10 \Omega/\text{m}^2$) pro speciální aplikace [4].

Chemické nanášení je bezproudové pokovování kovů a plastů za účelem dosažení rovnoměrné vrstvy způsobem řízení autokatalické redukce. Bezproudové pokovování zahrnuje nános kovů, jako měď, nikl, stříbro, zlato nebo palladium na povrchy různých materiálů pomocí redukující chemické lázně. Nekovové povrchy musí být nejprve upraveny pomocí kyseliny chromité následované katalitickou úpravou roztokem chloridu cínatého nebo chloridu palladnatého. Mezi běžně používané kovy patří: měď, nikl, zlato a stříbro. V porovnání s elektrolytickým pokovováním má bezproudové pokovování následující výhody [4].

- pokovené mohou být i nevodivé materiály,
- vrstva je rovnoměrná,
- proces je jednoduchá a nevyžaduje elektrickou energii.

Typický pokovovací roztok má následující složení: sole kovů, redukční prostředek, komplexotvorný prostředek, tlumiče a stabilizátory[4].

Bezproudové pokovování je cenově nákladnější. Tloušťka nanesených filmů se pohybuje okolo $1 \mu\text{m}$ [4].

2.1.5 Bikomponentní vlákna

Kombinací dvou různých komponent v jediném bikomponentním vlákně, lze získat speciálně vlákna speciálních vlastností, struktur a jejich použitím specifické textilní produkty [4].

Definice říká: bikomponentní vlákna jsou syntetická vlákna, která jsou tvořena dvěma polymery odlišné chemické nebo fyzikální struktury, které jsou pevně, ale oddělitelně spojeny. Polymery jsou zvlákňovány zvlákňovací tryskou buď vedle sebe (typ side-by-side), obklopením jednoho proudu taveniny jiným proudem taveniny (typ core/sheath), nebo jako nehomogenní směs[4].

V závislosti na typu zvlákňovací trysky jsou vytvářena různá bikomponentní vlákna. Rozlišují se tři základní druhy: typ strana/strana (S/S), typ jádro/plášť (C/S) a typ matrice/vlákno (M/F).

Výroba bikomponentních vláken je možná zvlákňováním z taveniny, z roztoku a elektrostatickým zvlákňováním

Při tvorbě vodivých bikomponentních vláken se používá vodivá složka. Jako vodivé materiály se používají kovové prášky (stříbro, měď, nikl), uhlíkové látky (uhlíková čern, grafit, uhlíková vlákna), kysličníky kovů (kysličník zinečnatý, cíničitý, antimonový) a anorganické částice pokryté kysličníky kovů. Jako vhodně se jeví zpracování typem core/sheath (C/S), kdy je vodivé jádro chráněno vrstvou polymeru. Efekt elektrické vodivosti je však omezen. Proto se používá celá řada dalších uspořádání bikomponentních vláken, kdy se alespoň část elektricky vodivé vrstvy dostává na povrch vlákna [1].

Evropský patent popisuje výrobu bikomponentního elektricky vodivého dlouženého polyesterového vlákna. Toto vlákno má první komponentu tvořenou polyesterem a rozptýlenými sazemi (10 – 50 %), druhá komponenta je tvořena také polyesterem, teplota tání těchto dvou polyesterů se však liší cca o 2°C [4].

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

V rámci experimentální části práce byla provedena elektromechanická analýza délkového a kontaktního odporu vybraných elektricky vodivých textilních struktur. Studována byla zejména závislost elektrického odporu příze na upínací délce délkového textilního útvaru (příze), mechanické vlastnosti příze, ekvivalentní elektrický odpor vodivé příze, smyčky a řetízku vytvořeného vodivou přízí při jednoosém namáhání tahem.

3 Studovaný materiál

Na počátku řešení bakalářské práce bylo provedeno porovnávací hodnocení elektrických vlastností vybraných délkových textilních útvarů – přízí klasických (100% CO, 100% PES), antistatických (příze obchodního označení Beltron a Rezisitat) a vodivých (příze pokovené, hybridní příze obsahující staplová nerezová ocelová vlákna, atd.). Pro další experimentální činnost byla zvolena příze, která vyniká vysokou vodivostí, lineární závislostí elektrického odporu na upínací délce a uspokojivou tažností. Jedná se o přízi obchodního označení Shieldiex® dodávanou německou společností Statex.

3.1 Příze Statex - SHIELDEX®

Tato příze byla vyvinuta Německou firmou Statex. Příze je tvořena nekonečnými pokovenými vlákny. Jádro vlákna je tvořeno polyamidem a obal tvoří submikronová vrstva stříbra.

Díky svým anti-statickým a anti-bakteriálním vlastem, vysoké elektrické a tepelné vodivosti jsou SHIELDEX ® nitě používané v mnoha ohledech.

Využívají se všude tam, kde jsou zapotřebí zvláště odolné příze proti roztržení. Uplatnění najdou i oblasti inteligentních textilií. I automobilový průmysl těží z antistatických a elektricky vodivých vlastností přízí SHIELDEX ® [14].

Polyamid 66

Polyamid 66 je polyamid z hexamethyldiaminu a kyseliny adipové $\left([NH(CH_2)_6NHCO(CH_2)_4CO]_n\right)$. Hlavní surovinou pro výrobu polyamidu 66 je vodný

roztok organické soli, získaný reakcí 1,6-hexamethylendiaminu s 1,6-hexadikarboxylovou kyselinou (kyselina adipová), také zvaná AH sůl, sůl 66 nebo nylonová sůl. [16]

Jde o původní patent W. Carotherse od firmy DuPont z roku 1935. Je rozšířen zejména v USA pod názvem NYLON [1].

Výroba

Obecně může být PA 66 vyráběn dvěma různými procesy:

- kontinuální polymerací
- diskontinuální polymerací

K získání polymeru s vysokou molekulovou hmotností je vyžadován další krok, a to následná polymerace v pevné fázi [16].

Stříbro

Stříbro má mnoho použití, a to zejména při využití v průmyslových výrobních procesech. Po celá staletí nachází uplatnění v různých oblastech. Specifické vlastnosti vyčleňují stříbra z ostatních kovů.

Stříbro je elektricky vodivé, antistatické, antibakteriální, fungicidní, zabraňuje hromadění mikroorganismů a tím i tvorbě zápachu. Stříbro urychluje hojení ran a používá se k regulaci tělesné teploty. Umožňuje využití pro tvorbu elektromagnetického stínění.

Elektromagnetické stínění je jednou z možných aplikací stříbra, a to díky jeho vysoké vodivosti. Využívá se pro ochranu před elektromagnetickým zářením a případně před zneužitím dat. Postříbřená vodivá vlákna je možno využít pro spojení inteligentních technologií mikrosystémů s textilními strukturami. Stříbrná vlákna také působí proti nežádoucím bakteriím a plísním, což představuje pozitivní dopad, který je užitečný ve zdravotnictví a veterinářství. Postříbřené materiály mohou být použity pro anti-mikrobiální úpravy vody. Kombinací stříbra mědi, niklu a cínu se vytvoří silnější kovové vrstvy, které slouží pro odstínění. Měď je podobně jako stříbro antibakteriální a fungicidní [14].

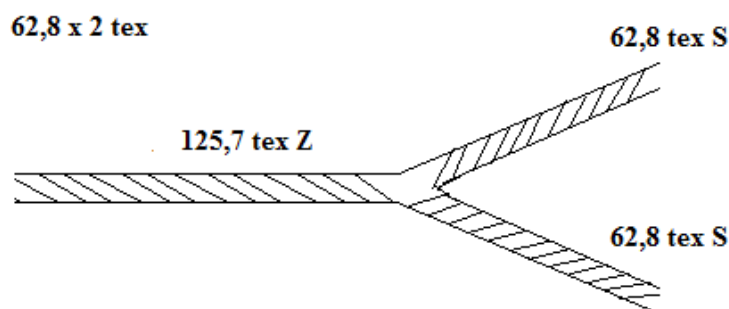
3.1.1 Konstrukce příze

Základní analýzou bylo zjištěno, že příze je skaná ze dvou multifilů s pravým zákrutem, jeden multifil obsahuje 68 filamentů (průměrná jemnost vláken je 9,13 dtex). V tabulce 3 jsou uvedeny základní parametry příze. Počet skacích zákrutů X_s , získaný přímou metodou měření je 74 z/0,25 m. Počet přádních zákrutů získaných nepřímou

metodou X_p je 484 z/0,5 m. Změna délky příze po rozkroucení je 74 mm. Na obrázku 13 je nakreslené schéma testované příze.

Tabulka 3: Parametry vodivé příze.

Jemnost T [tex]	Skací zákruty X_s [z/0,25m]	Změna délky příze po rozkroucení Δl [mm]	Přádní zákruty X_p [z/0,5]	Průměrná pevnost [N/tex]	Průměrná tažnost [%]
125,7	362	-0,5	442	45,71	38,07



Obrázek 13: Schéma konstrukce příze.

Analyzovány byly také základní vlastnosti vláken tvořících přízi. Jemnost vláken byla měřena na přístroji VIBROSKOP 400, na kterém je možné stanovit délkovou hmotnost vlákna. Přístroj je spojen s přístrojem pro měření pevnosti vláken VIBRODYN 400. Oba přístroje jsou propojeny s počítačem, přístroje jsou zobrazeny na obrázku 12. Software umožňuje statistické vyhodnocení jemnosti, pevnosti, tažnosti a poměrné pevnosti [cN/tex], [cN/den] zároveň zobrazuje pracovní křivky vláken. Průměrné hodnoty základních měřených charakteristik vláken jsou uvedeny v tabulce 4. V příloze číslo 1 jsou uvedeny výsledky měření a pracovní křivka vláken.

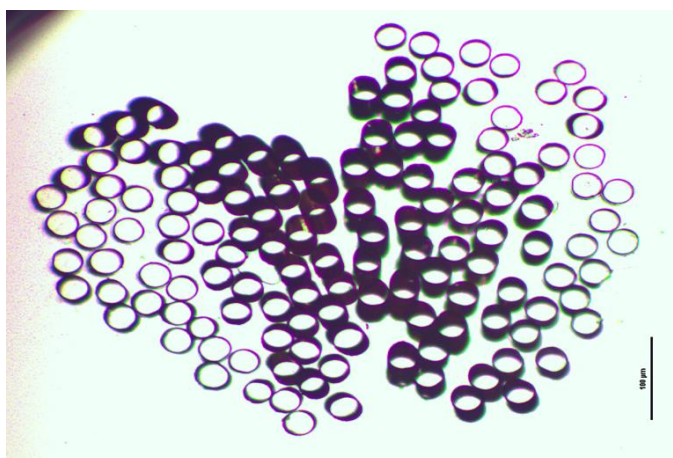
Tabulka 4: Průměrné hodnoty základních charakteristik vláken.

	Jemnost [dtex]	Tažnost [%]	Pevnost [cN]	Relativní pevnost [cN/tex]	Youngův modul [cN/dtex]
Počet měření	50	50	50	50	50
Průměrné hodnoty	9,13	30,37	37,37	41,08	27,16
Směrodatná odchylka	0,55	6,89	6,41	6,88	4,93

	Jemnost	Tažnost	Pevnost	Relativní pevnost	Youngův modul
	[dtex]	[%]	[cN]	[cN/tex]	[cN/dtex]
Variační koeficient	6,04	22,67	17,15	16,76	18,16
Minimální hodnota	7,9	0,8	0,49	0,48	19,82
Maximální hodnota	10,43	45,4	42,85	47,64	32,03

3.1.2 Vhled příze

Pro vizuální reprezentaci studované příze byl vytvořen příčný řez a podélný pohled. Příze byla zpevněna speciálním lepidlem a příčný řez byl vytvořen za použití mikrotomu, viz obrázek 14. Na obrázku 15 je podélný pohled na přízi, ten byl zaznamenán za pomoci video makroskopu Navitar, který je napojený na kameru Imaging Source DFK 23U445 Camera.



Obrázek 14: Příčný řez.



Obrázek 15: Podélný pohled.

3.2 Metodika měření

V rámci práce byly testovány zejména mechanické vlastnosti, elektrické vlastnosti reprezentované měřením elektrického odporu a následně sledování změny elektrického odporu textilního útvaru při jednoosém namáhání příze tahem. Následující podkapitoly stručně shrnují průběh odběru vzorků, klimatické podmínky při měření a popisují zařízení, která byla v práci využita.

3.2.1 Odběr a příprava vzorků

Odběr vzorků délkové příze byl proveden podle ČSN EN 12751 (800070). Podle této normy bylo nutné připravené vzorky předsušit 2 h při teplotě $(60 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ a potom byly klimatizovány minimálně 24 h v klimatických podmínkách uvedených výše.

Norma také uvádí, že při manipulaci se vzorky nesmí dojít k jejich znečištění. To znamená, že nedošlo ke styku s pokožkou, působení chemikálií nebo jiných vnějších vlivů. Manipulace se provádí pomocí pinzety a rukavic.

3.2.2 Podmínky při zkoušce

Měření elektrického odporu bylo prováděno při těchto klimatických podmínkách (ČSN 80 0059):

Teplota $t = (20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$

Relativní vlhkost vzduchu $\varphi_1 = (20 \pm 3)\%$ nebo $\varphi_2 = (65 \pm 2)\%$

Testovací napětí: 10 V pro hodnoty elektrického odporu do $10^5 \Omega$
100 V pro vyšší resistance (ČSN EN 61340-5-2)

3.2.3 Měřicí zařízení

Pro realizaci elektromechanické analýzy vodivých přízí byly využívány především následující zkušební zařízení.

Zkušební stroj LabTest

Přístroj se používá při kontrole kvality výroby, vstupních, výstupních kontrol materiálu a výrobků ve zkušebnách, laboratořích i průmyslovém prostředí. Umožňují provádět testování materiálu v tahu, tlaku, ohybu, krutu, odlupovací, odtrhávací, penetrační

a třecí zkoušky ve statickém a dynamickém namáhání vzorků a celých výrobků. Zařízení je způsobilé pro použití v systémech jakosti podle ISO 9001:2009.

Zařízení je digitální jedno-sloupový stroj se zatížením do 3kN. Provedení je stolní s možností variabilní šířky a výšky s jedním pracovním prostorem. Rozsah měření síly je od 0,4 % do 100 % rozsahu snímače. Zařízení je zobrazeno na obrázku 16 [7].

Výhody zkušebního stroje LabTest®:

- jednoduché ovládání a zkoušení,
- vysoká tuhost rámu stroje a odolnost vůči vibracím,
- velmi tichý chod AC servomotoru,
- vhodné do vysoké zátěže,
- nejvyšší přesnost mechanického zpracování,
- libovolně konfigurovatelné provedení,
- smplovací frekvence 1kHz nebo 5kHz,
- software T&M - 9-ti jazyčná verze [7].

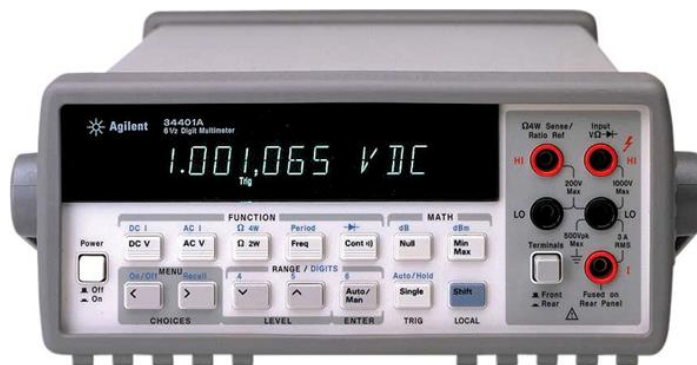


Obrázek 16: Zkušební stroj – LabTest [7].

Stolní multimetr Agilent

Přístroj 34401A, zobrazen na obrázku 17 je číslicový multimetr umožňující měření stejnosměrného a střídavého napětí a proudu, odporu dvouvodičovou i čtyřvodičovou

metodou, měření periody a frekvence. Dále je možno kontrolovat polaritu a funkci PN přechodů a zjišťovat vodivá spojení v obvodech s indikací akustickým signálem. Přístroj je vybaven displejem s rozlišením $6\frac{1}{2}$ digitů, měřicí rozsah je nastavován automaticky nebo manuálně [18].



Obrázek 17: Solní multimetr – Agilent [18].

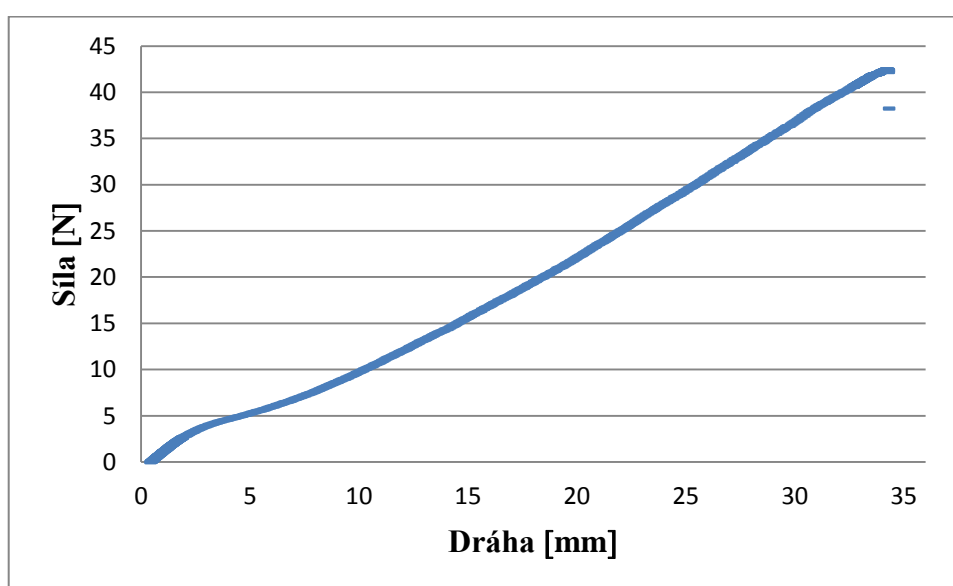
3.3 Hodnocení mechanických vlastností příze

Pevnost a tažnost jsou základními charakteristikami všech typů délkových textilních útvarů. S ohledem na následující experimenty hodnotící elektromechanické chování příze bylo nejprve testováno, jakou silou můžeme na přízi působit do přetrhu a jaká je její tažnost. Provedeno tedy bylo jednoosé namáhání příze tahem na trhačím přístroji LabTest. Vzorek byl nejprve upnut do čelistí, základní upínací délka byla 100 mm, a následně namáhán tahem rychlostí 20 mm/min až do přetrhu příze. Tato upínací délka byla zvolena s ohledem na další elektromechanické zkoušky a také z důvodu omezeného množství testovaného materiálu. Relativně nízká rychlost posuvu čelistí byla zvolena na základě literární rešerše článků publikovaných v odborných časopisech. Rychlost posuvu bylo třeba nastavit tak, aby bylo možno při použití stejné rychlosti zaznamenávat také změny elektrického odporu příze při deformaci tahem. Otestováno bylo 20 vzorků příze.

Testovací přístroj je připojen k počítači s nainstalovaným softwarem LabTest v.3, od společnosti LaborTech, s.r.o., který celý průběh zaznamenává a vyhodnocuje výsledky. Průměrná síla při přetržení vzorku F_b je 45,71 N. Průměrná hodnota tažnosti při maximální dosažené síle A_{max} je 37,69 mm. Tažnost při roztržení vzorku A_b , průměrná hodnota je 38,07 %. V tabulce 5 jsou zobrazeny průměrné hodnoty a statistické vyhodnocení naměřených dat pro následující veličiny: pevnost, prodloužení, tažnost a čas do přetrhu. Graf na obrázku 18 zobrazuje pracovní křivku při napínání příze.

Tabulka 5: Statistické hodnoty měření pevnosti příze.

	Pevnost Fb [N]	Prodloužení Amax [mm]	Tažnost Ab [%]	Čas do přetrhu t [s]
Počet zkoušek	20	20	20	20
Průměrná hodnota	45,71	37,69	38,07	112,7
Směrodatná odchylka	2,51	1,6	1,64	4,63
Variační koeficient	5,48	4,23	4,3	4,11
Minimální hodnota	38,26	34,23	34,34	101,71
Maximální hodnota	49,05	40,58	40,94	120,81

**Obrázek 18:** Tahová křivka příze.

3.4 Hodnocení elektrických vlastností příze

Elektrický odpor příze byl měřen pomocí dvou vodičové metody, která je pro názornou ukázkou zobrazena na obrázku 1. Na nosnou desku byla upnuta pomocí elektrického kontaktu příze ve třech délkách (10 cm, 20 cm, 30 cm). Měření proběhlo za normalizovaných podmínek. Různé upínací délky byly zvoleny z důvodu zjištění skutečného elektrického odporu s vyloučením vlivu neznámých kontaktních odporů. Ohmmetrem připojeným k přípojkám příslušných elektrických kontaktů byl změřen celkový odpor úseku délkového textilního útvaru zkoušeného vzorku včetně součtu příslušných dvou kontaktních odporů.

Na obrázku 19 je zobrazena závislost elektrického odporu na upínací délce. Je zřejmé, že závislost elektrického odporu na upínací délce je lineární a lze ji aproximovat přímkou. Směrnice této přímky představuje délkový odpor R_L a průsečík se svislou osou udává kontaktní odpor ΔR . Dosazením průměrných hodnot do rovnice:

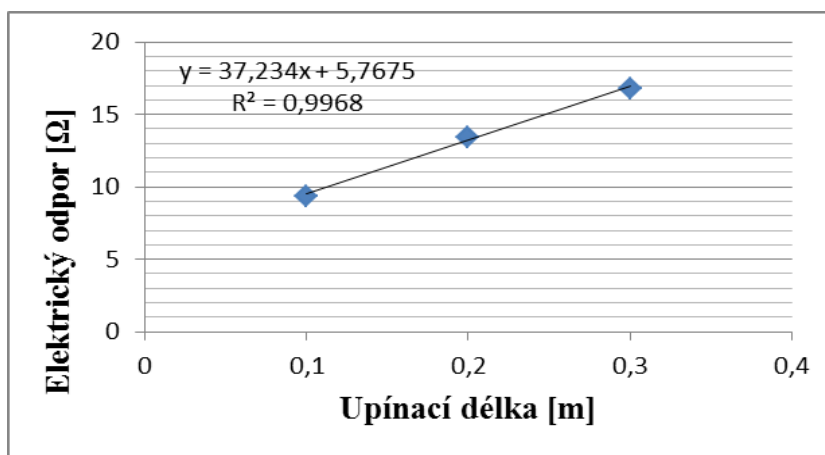
$$y = R_L \cdot x + \Delta R \quad (33)$$

byl vytvořen příslušný graf, který je na obrázku 19. Graf zobrazuje výslednou délkovou rezistivitu, $R_L = 37,2 \, \Omega/\text{m}$. Jak je patrné z rovnice přímky, celkový kontaktní odpor dosahuje výše cca $5,8 \, \Omega$, což znamená, že v obou upínacích místech (styk kovové svorky s měřeným materiálem) vzniká kontaktní odpor cca $2,9 \, \Omega$. V tabulce 6 jsou uvedeny průměrné hodnoty naměřeného elektrického odporu.

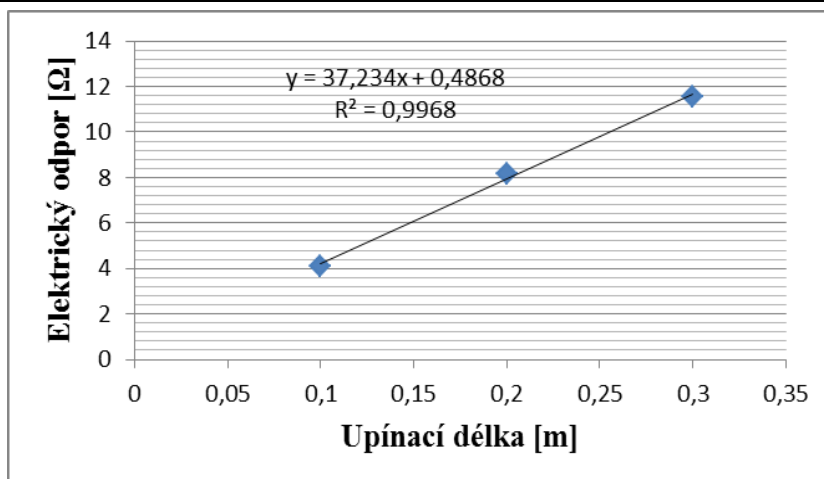
Tabulka 6: Průměrné hodnoty elektrického odporu příze.

	Upínací délka		
	100 mm	200 mm	300 mm
Průměrný odpor [Ω]	9,369	13,458	16,816
Průměrný odpor po odečtení kontaktních odporů [Ω]	4,089	8,178	11,536

S využitím vztahu (21) byl vypočten elektrický odpor délkového úseku příze s vyloučením kontaktních odporů. Grafické vyjádření je možno nalézt na obrázku 20. Průměrné hodnoty elektrického odporu s eliminací kontaktních odporů pro jednotlivé upínací délky jsou zobrazeny v tabulce 6. Výsledky měření jsou uvedeny v příloze č. 2.



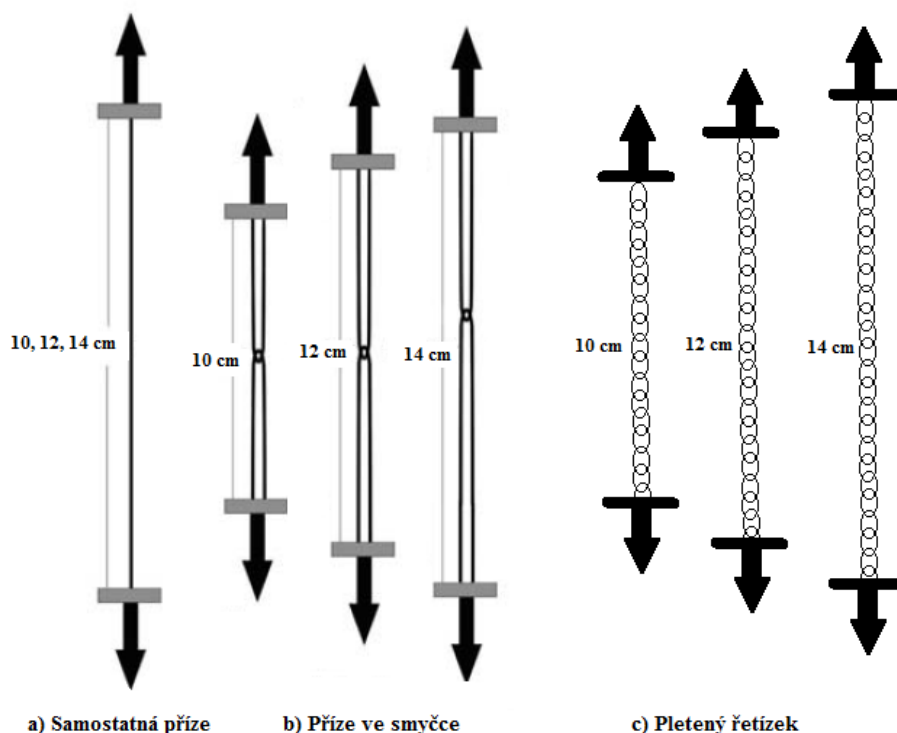
Obrázek 19: Délková rezistivita.



Obrázek 20: Délková rezistivita s vyloučením kontaktních odporů.

3.5 Elektromechanická analýza příze

Elektricky vodivá příze byla podrobena několika dalším experimentům, při kterých byl zjišťován vztah mezi deformací příze tahem a jejím elektrickým odporem při různém uskupení příze. Schéma na obrázku 21 představuje jednotlivé dílčí experimenty. Konkrétně se jedná o hodnocení: (a) změny elektrického odporu jednoduché příze namáhané jednoosým tahem při třech upínacích délkách, (b) změnu elektrického odporu přízí tvořících smyčku, namáhaných jednoosým tahem při třech upínacích délkách a (c) změnu elektrického odporu řetízku vytvořeného z vodivé příze při namáhání jednoosým tahem testovanou při totožných upínacích délkách.

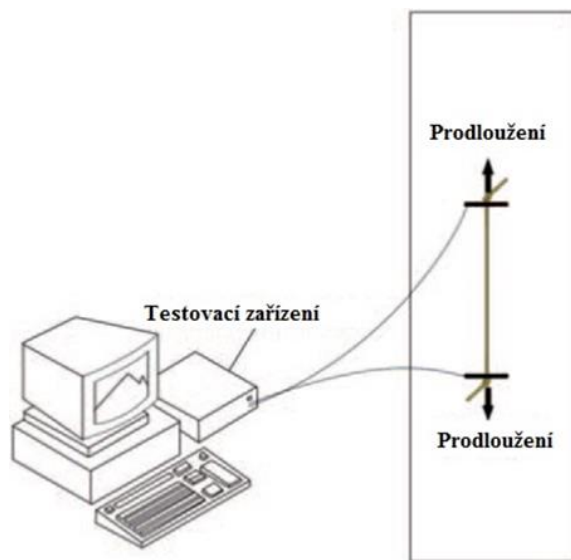


Obrázek 21: Schematické znázornění uskupení experimentu (a) experiment A - měření délkového odporu při napínání příze, (b) experiment B - měření kontaktního odporu příze tvořící smyčku a (c) experimentu C - měření kontaktního odporu příze v řetízku [12].

3.5.1 Modifikovaná metodika měření

V rámci práce byla měřicí sestava uzpůsobena tak, aby umožňovala zároveň mechanické namáhání textilního útvaru tahem a snímání elektrického odporu příze v reálném čase. Seskupení měřících zařízení je znázorněno na obrázku 22. Řešena byla problematika upnutí elektrod takovým způsobem, aby nedocházelo ke vzniku chyb způsobovaných nepřesným upnutím, posuvem elektrod po materiálu během testování či samotnou váhou elektrody působící na přízi. V předešlých pracích byly elektrody připevněny k měřenému materiálu pomocí měděného drátku, který byl kolem testované příze obtočen. Tento kontakt byl proveden mimo čelisti dynamometru. Toto původní nevhodné řešení bylo modifikováno následovně. Propojení příze s multimetrem bylo realizováno pomocí měděných destiček připevněných přímo mezi čelisti přístroje LabTest. Zkušební vzorek byl oběma konci upnut do měděných destiček v čelistech. K měděným destičkám byly přivedeny vodiče multimetru. K přenosu naměřených dat z multimetru v reálném čase při namáhání příze tahem bylo využito software LabView. Pomocí tohoto uskupení bylo možno testovat zároveň jak sílu působící na přízi při namáhání tahem, tak

její deformace a zároveň také změnu elektrického odporu. Veškerá naměřená data (síla, deformace, čas, elektrický odpor) byla ukládána v reálném čase.



Obrázek 22: Experimentální znázornění elektromechanické analýzy [12].

3.5.2 Experiment A: Změna elektrického odporu při jednoosém namáhání příze tahem

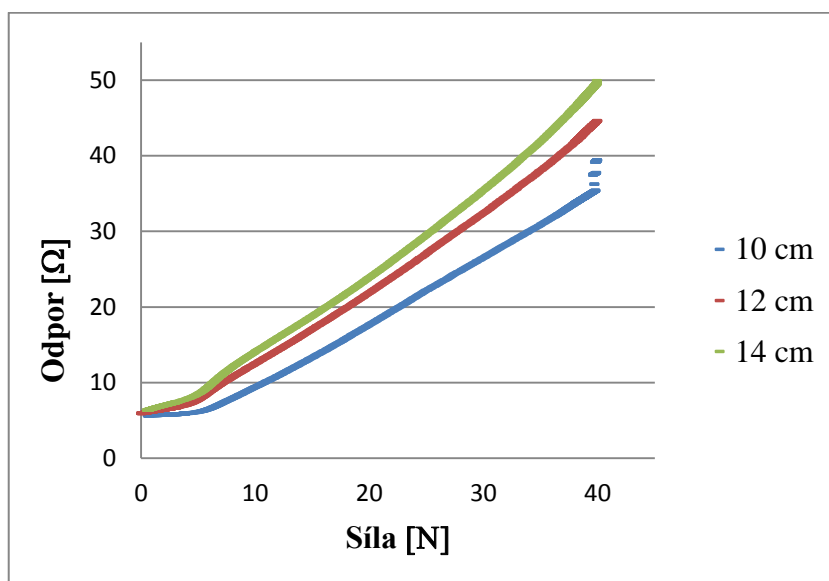
V rámci tohoto experimentu bylo provedeno měření při třech různých upínacích délkách (10, 12 a 14 cm). Při každé upínací délce bylo provedeno pět opakování. Data byla zaznamenána v programu Labtest, který zachycoval mechanickou stránku experimentu a pomocí programu Labview byl zpracován příslušný elektrický odpor. Síla byla měřena v závislosti na deformaci a čase. Elektrický odpor byl měřen v závislosti na čase. Časový interval zápisu dat v prostředí Labtest a Labview byl odlišný. Aby bylo možno vztáhnout elektrický odpor na aplikovanou sílu či deformaci příze, bylo nutno jednu ze závislostí aproximovat vhodnou obecnou funkcí. Nejprve byla vytvořena grafická závislost průměrných hodnot naměřeného elektrického odporu (osa y) na čase měření (osa x) elektrické části měření. Následně byla tato závislost aproximována polynommickou funkcí ve tvaru:

$$y = a_n x^n + a_{n-1} x^{n-1} + \dots + a_2 x^2 + a_1 + a_0. \quad (34)$$

Dosazením do rovnice (34) odpovídající intervaly zápisu trvání zkoušky z mechanické části (prostředí Labtest), byly získány odpovídající hodnoty odporu pro časové intervaly zápisu dat shodných s měřením mechanických vlastností. Z takto získaných dat byl vytvořen výsledný graf, zachycující vztah mezi délkovým odporem a

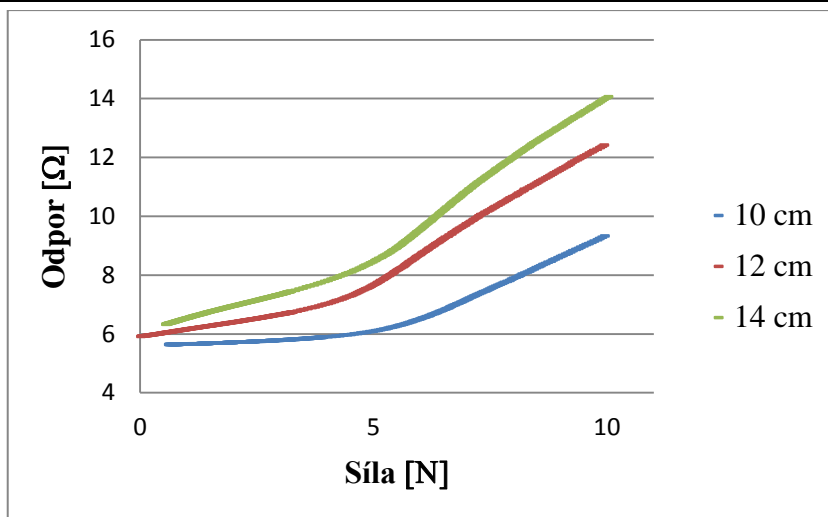
Elektromechanické vlastnosti textilních útvarů se zvýšenou elektrickou vodivostí 44

tahovou silou působící na vodivou přízi. Na obrázku 23 je tedy zobrazena závislost elektrického odporu na síle působící na přízi při jednoosém namáhání tahem pro tři odlišné upínací délky.

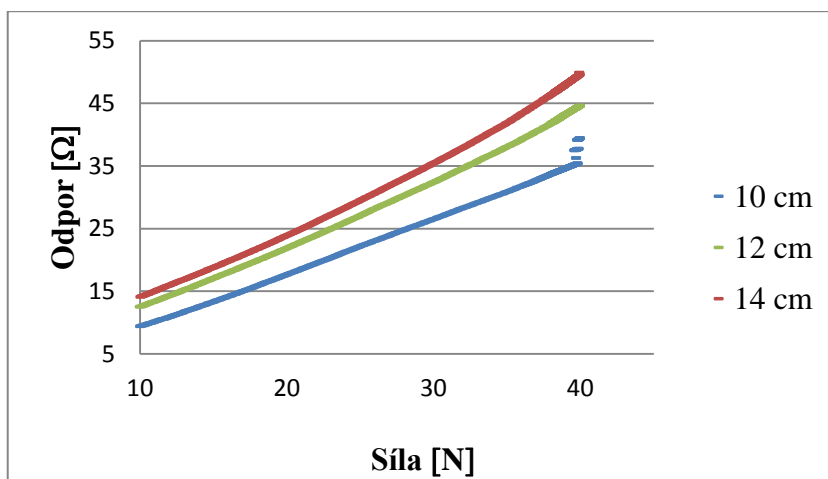


Obrázek 23: Vztah mezi délkovým odporem a tahovou silou jednotlivých vodivých vláken různých délek.

Z obrázku je patrné, že elektrický odpor příze se zvyšuje (nelineárně) se zvyšující se působící silou. Tento jev je potvrzen u všech třech upínacích délek. Dále lze pozorovat, že čím vyšší je upínací délka, tím vyšší je elektrický odpor daného úseku příze, což je v souladu s teoretickým rozbohem. V předvedené závislosti lze rozlišit dvě oblasti. Oblast nízkých deformací (cca v oblasti 0 – 5 N), kde elektrický odpor příze roste zcela nepatrně. Detailní zobrazení této oblasti je na obrázku 24. Tento jev je způsoben zákrutem příze, který zapříčiní vyšší kontakt vláken ve struktuře při počátečním deformaci příze a způsobí tedy nižší kontaktní odpor mezi vlákny příze. Dále lze rozlišit oblast vyšších deformací (působení cca 10 – 40 N), kde je možno pozorovat strmější růst elektrického odporu. Závislost elektrického odporu na působící síle v této oblasti je možno aproximovat přímkou. Oblast vyšší deformace je na obrázku 25. Z provedeného experimentu lze shrnout, že jednoduchá vodivá příze při jednoosém namáhání tahem vykazuje jak délkový odpor, tak nezanedbatelný kontaktní odpor. Hlavním odporem při napínání, však zůstává délkový odpor.

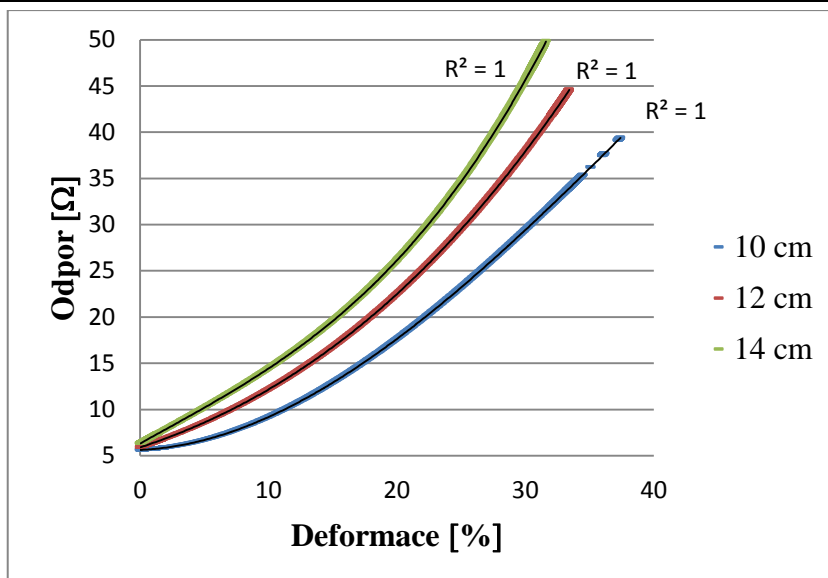


Obrázek 24: Oblast nízké deformace při jednoosém namáhání tahem.



Obrázek 25: Oblast vyšší deformace při jednoosém namáhání tahem.

Při jednosměrném natahování vzorku příze dochází k jeho prodlužování, čili dojde k deformaci. Závislost deformace a elektrického odporu je na obrázku 26. Jednotlivé křivky byly aproximovány polynomicou funkcí (34) třetího stupně. U všech tří upínacích délek je koeficient determinace $R^2 = 1$, počáteční odpor se pohybuje okolo 6Ω , následně dochází k růstu. Lze pozorovat, že například u upínací délky 14 cm je počáteční odpor $6,3 \Omega$, při deformaci 31 % vzroste až na 50Ω .



Obrázek 26: Vztah deformace a elektrického odporu při jednosměrném namáhání tahem.

3.5.3 Experiment B: Kontaktní odpor dvou vodivých přízí tvořících smyčku

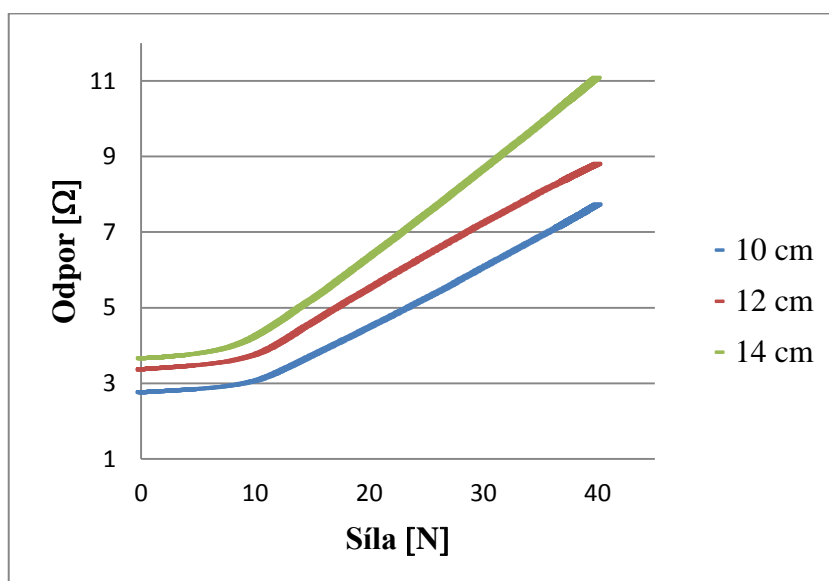
V dalším experimentu byly použity dvě překrývající se vodivé příze, které tvoří smyčku, jak zobrazuje schéma na obrázku 27.

Celkový odpor je považován za součet dvou faktorů: délkového odporu a kontaktního odporu. Vztah mezi celkovým odporem a tahovou silou, pro různé upínací délky příze, znázorňuje graf na obrázku 28. Lze pozorovat, že se vzrůstající působící silou celkový elektrický odpor vzrůstá, přičemž lze rozlišit dvě oblasti. Oblast nízkých deformací, kde lze pozorovat jen velmi pozvolný růst elektrického odporu se vzrůstající silou, což je způsobeno kontaktním odporem, který se snižuje s působící silou v oblasti křížení přízí při počátečním působení síly. V oblasti vyšších deformací dochází ke strmějšímu růstu elektrického odporu v důsledku napínání přízí. Délkový odpor roste se zvyšující se působící silou. Tento jev je možné pozorovat u všech tří upínacích délek. Současně platí, že čím delší upínací délka je, tím je vyšší elektrický odpor. V oblasti nízké deformace (cca oblast 0 – 5 N) roste odpor velice nepatrně. Detailní oblast nízké deformace je na obrázku 29. Elektrický odpor upínací délky například 14 cm v relaxovaném stavu je cca 3,6 Ω, aplikováním síly 5 N vzroste pouze na 3,8 Ω, zatížením na 40 N vzroste odpor na 11 Ω.

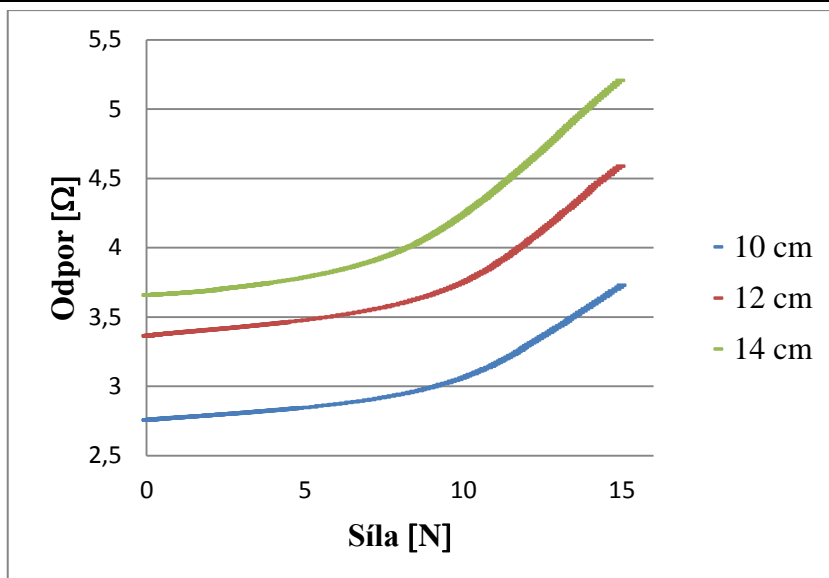
Závislost elektrického odporu na deformaci příze při jejím jednoosém namáhání tahem pro tři upínací délky je zobrazena na obrázku 30. Hodnoty byly aproximovány polynomicou funkcí třetího stupně, ve všech případech je koeficient deformace $R^2 = 1$.



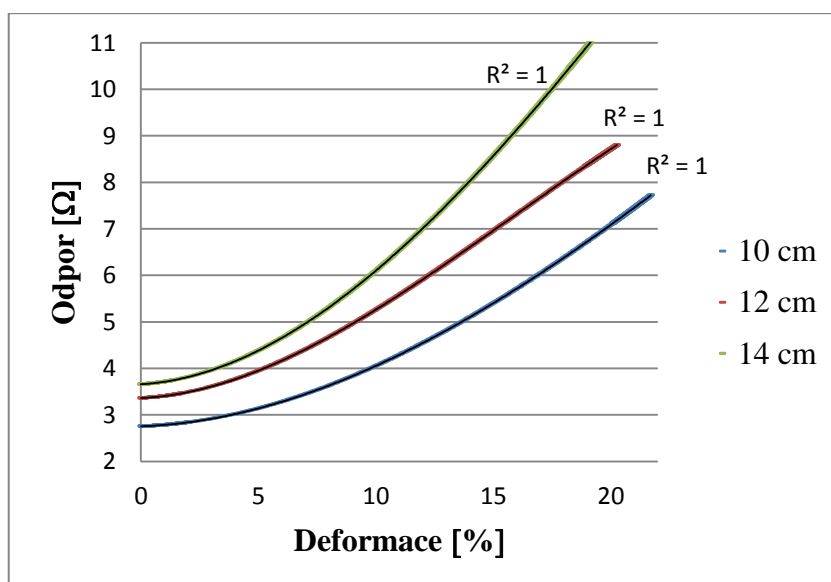
Obrázek 27: Schematické znázornění napínání dvou přízí ve smyčce.



Obrázek 28: Závislost mezi celkovým elektrickým odporem a silou dvou překrývajících se vodivých přízí tvořících smyčku pro tři upínací délky.



Obrázek 29: Oblast nízké deformace při měření kontaktního odporu dvou překrývajících se vodivých přízí.



Obrázek 30: Závislost elektrického odporu na deformaci při měření odporu překrývajících se vodivých přízí.

3.5.4 Experiment C: Kontaktní odpor vodivého háčkovaného řetízku

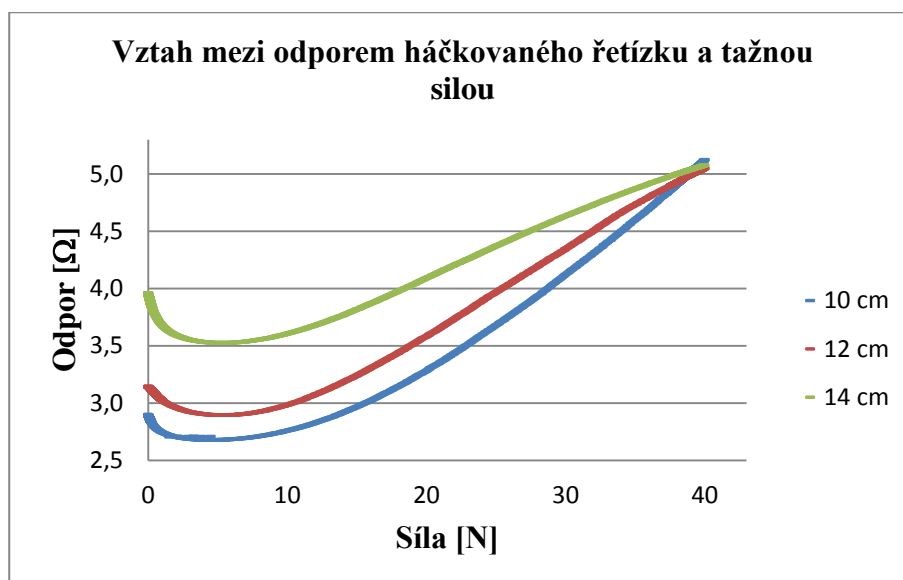
Řetízek byl ručně háčkován pomocí speciální jazýčkové jehly. Schéma příze tvořící řetízek je zobrazené na obrázku 31. Stejně jako v předešlých dvou experimentech byl řetízek upnut pomocí měděných destiček přímo do svorek dynamometru. S pomocí měřicího zařízení LabTest byl řetízek napínán do maximální síly 40 N a stolním multimetrem byl měřen elektrický odpor při namáhání. Byly měřeny tři upínací délky

řetízku 10, 12 a 14 cm. Výsledky měření, tedy závislost elektrického odporu na působící síle jsou zobrazeny na obrázku 32. Z tohoto grafu je patrné, že na počátku působení silou elektrický odpor výrazně klesá. Pokles je způsobený velkým počtem kontaktních míst v řetízku a tedy výrazným poklesem kontaktního odporu. Následným dalším napínáním dochází k růstu elektrického odporu. Tento jev je způsobený samotným napínáním příze.

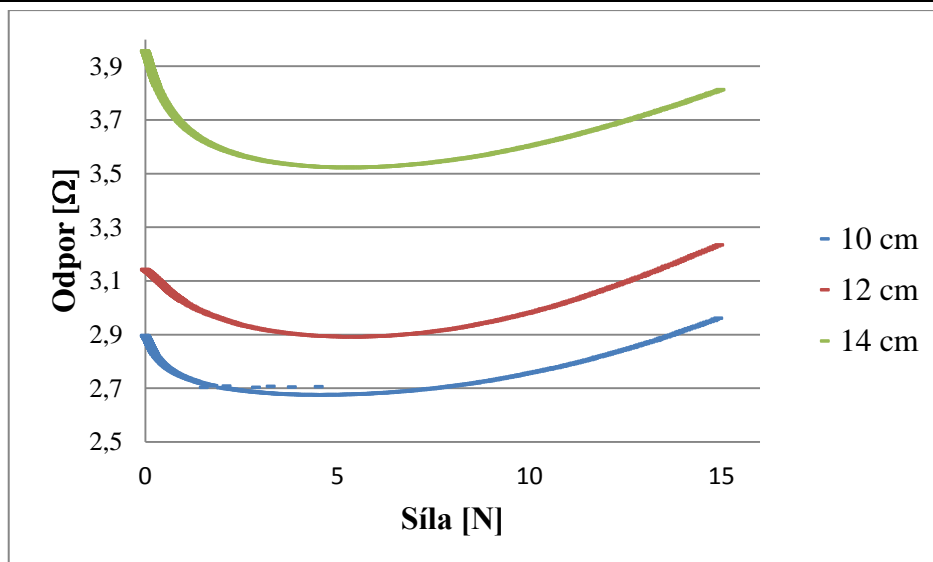
Jak je patrné z obrázku 33, v oblasti nízké deformace (cca oblast 0 – 5 N) elektrický odpor poklesne. Na počátku měření je hodnota elektrického odporu u řetízku upínací délky 14 cm $3,9 \Omega$, v oblasti nízké deformace klesne až na hodnotu $3,5 \Omega$. Při dalším zvyšování působící síly dochází k růstu elektrického odporu. Při síle 40 N vzroste hodnota odporu na 5Ω .



Obrázek 31: Schéma háčkového řetízku.

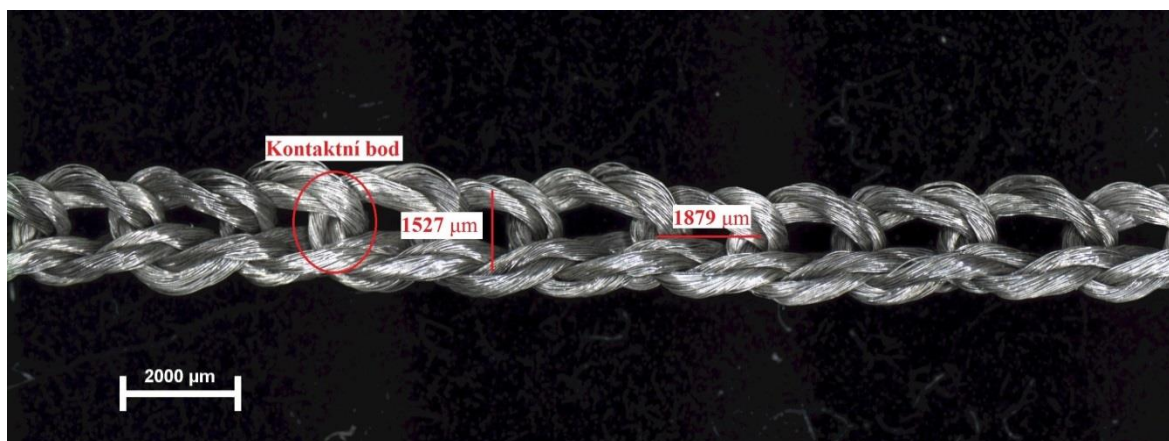


Obrázku 32: Vztah mezi celkovým odporem v tahu a silou, vodivého háčkového řetízku o třech délkách.



Obrázek 33: Oblast nízké deformace při měření elektrického odporu háčkovného řetízku namáhaného tahem

Vzhledem k tomu, že byl řetízek uháčkovaný ručně, nejsou jednotlivá očka stejně velká. Pomocí obrazové analýzy byly vytvořeny snímky řetízku před napínáním, viz obrázek 34 a po napínání (obrázek 35). Před napínáním byla průměrná délka oka 1897 μm a šířka 1527 μm . Po napínání byl řetízek značně deformovaný, průměrná délka oka se změnila na 2575 μm a šířka na 1436 μm . V důsledku působení tažné síly na pleteninu, se poloměr zakřivení v ohybu změnil. Data z měření jsou v příloze 3.



Obrázek 34: Háčkový řetízek před napínáním.



Obrázek 35: Háčkový řetízek po napínání.

3.5.5 Kontaktní odpor pleteniny

V důsledku nedostatku materiálu nemohl být proveden poslední experiment. Ten by se zabýval měřením elektrického odporu pleteniny při jednosměrném napínání tahem. Na základě získaných vědomostí z předchozích experimentů (smyčka, řetízek) lze předpokládat jaké bude chování pleteniny při aplikaci síly

Lze předpokládat, že na počátku působení síly by elektrický odpor výrazně klesal. V této fázi působí na pleteninu tažná síla proti třecí síle, ta vzniká v kontaktním místě mezi smyčkou a došlo by k výraznému poklesu kontaktních odporů. Současně dochází k pohybu kontaktního místa. V průběhu dalšího napínání by postupně rostl elektrický odpor v důsledku napínání jednotlivých přízí

3.6 Aplikace vodivé příze v inteligentních textiliích

V dnešní době roste zájem o vývoj elektricky vodivých textilií pro průmyslové aplikace, jako jsou například senzory, flexibilní a lehké materiály používané pro elektromagnetické stínění, monitoring, přenos dat na oděvu, lékařské aplikace a oděvy zdravotní péče. Vodivé textilie také poskytují mnoho speciálních a mnohdy životně důležitých aplikací. Jejich uplatnění je k nalezení i v armádní oblasti. Tato problematika je více rozebrána v článku [11], který se věnuje tvorbě a výzkumu jádrových přízí, kde měděný drát tvoří jádro příze a zajišťuje dostatečnou elektrickou vodivost. Vnější vrstvu a tedy příjemný omak a transportní vlastnosti zajišťují bavlněná vlákna.

V článku [20] je popisován způsob integrování senzoru do oděvu, který je schopen měřit napětí v textilu. V experimentální části článku jsou zkoumány vlastnosti senzoru

z různých hledisek. Za účelem prokázání funkčnosti měření napětí v textilií byl vytvořen prototyp senzoru, ten je zobrazen na obrázku 36. Senzor je opatřen silikonovou vrstvou, která ho chrání před vlhkostí. Ten je schopen měřit držení vrchní části těla. Snímač byl připojen k zadní části přiléhavého trika. Přístroj měří napětí v oděvu způsobené různými pohyby těla. Funkčnost tohoto zařízení bylo testováno na 8 lidech, u kterých se hodnotilo držení těla.



Obrázek 36: Prototyp senzoru [20].

ZÁVĚR

Tato práce byla zaměřena na elektromechanickou analýzu délkového a kontaktního odporu elektricky vodivých textilních struktur. Cílem práce bylo analyzovat a prostudovat vhodnost použití příze jako senzor tahové deformace. Na počátku řešení experimentální části bakalářské práce bylo nutné vybrat vhodnou přízi pro připravovaný experiment. Výběr probíhal na základě hodnocení elektrických vlastností délkových textilních útvarů. Z nabízených přízí byla vybrána příze, která vynikala vysokou vodivostí a dobrou tažností. Tato příze má obchodní název Shieldiex® a je dodávána německou společností Statex. Příze je tvořena nekonečnými pokovenými vlákny. Jádrem vlákna je tvořeno polyamidem 66 a obal je tvořen submikronovou vrstvou stříbra. Nitě SHIELDEX ® jsou používány v mnoha odvětvích, vynikají díky svým anti-statickým a anti-bakteriálním vlastnostem, vysoké elektrické a tepelné vodivosti. Díky obsahu stříbra najdou své uplatnění také ve zdravotnictví, dále se využívají v oblastech, kde jsou zapotřebí příze zvláště odolné proti roztržení. Své uplatnění naleznou i oblasti inteligentních textilií a v automobilovém průmyslu.

V experimentální části byly u vybrané příze studovány mechanické vlastnosti, elektrická vodivost a následně elektromechanické vlastnosti. Ty jsou stěžejní pro tvorbu senzorů.

Pevnost a tažnost jsou základními vlastnostmi všech délkových textilních útvarů. U příze bylo provedeno jednoosé namáhání tahem na trhacím přístroji LabTest. Vzorek byl upnut do čelistí, základní upínací délka byla 100 mm. Následně byl namáhán tahem rychlostí 20 mm/min až do přetrhu příze. Průběh měření byl zaznamenáván do připojeného počítače a výsledky vyhodnocoval software LabTest v.3. Bylo zjištěno, že pevnost příze se pohybuje okolo 45,71 N, tažnost okolo 38,07 %.

Pro zjištění elektrického odporu příze byla použita tzv. dvou vodičová metoda. Na nosnou desku byla upnuta pomocí elektrického kontaktu příze ve třech délkách (10 cm, 20 cm, 30 cm). Více upínacích délek bylo zvoleno z důvodu jistění skutečného elektrického odporu s vyloučením neznámých kontaktních odporů. Výsledná délková rezistivita byla $R_L = 37,2 \Omega/\text{m}$. Bylo zjištěno, že kontaktní odpor v místě styku materiálu se svorkou činí cca $2,9 \Omega$.

Při měření elektromechanických vlastností byla nejprve vyřešena problematika umístění elektrod tak, aby nedocházelo ke vzniku chyb způsobených nepřesným upnutím a

posuvem elektrody po materiálu při namáhání tahem. Propojení příze s multimetrem bylo realizováno pomocí měděných destiček připevněných mezi čelisti přístroje LabTest. Zkušební vzorek byl oběma konci upnut do měděných destiček v čelistech dynamometru. K měděným destičkám byly přivedeny vodiče multimetru. K přenosu naměřených dat z multimetru v reálném čase při namáhání příze tahem bylo využito software LabView. Elektromechanické vlastnosti příze byly zjišťovány prostřednictvím třech dílčích experimentů. Mechanika upnutí příze byla u následujících tří experimentů stejná a vzorky byly proměřovány ve třech zvolených upínacích délkách (10 cm, 12 cm a 14 cm).

První experiment byl zaměřený na změnu elektrického odporu jednoduché příze namáhané jednoosým tahem. Bylo zjištěno, že se elektrický odpor zvyšuje (nelineárně) se zvyšující se působící silou. V počáteční fázi, v oblasti nízké deformace, u délky 10 cm bylo možné pozorovat mírný pokles elektrického odporu. Tento jev je způsoben zákrutem příze, který zapříčiní vyšší kontakt vláken ve struktuře při počátečním deformaci příze a způsobí tedy nižší kontaktní odpor mezi vlákny příze. Při dalším zvyšování působící síly následoval růst elektrického odporu.

Změna elektrického odporu příze tvořící smyčku, která je namáhaná jednoosým tahem vykazuje jak délkový odpor, tak také kontaktní odpor. Kontaktní odpor vzniká v oblasti křížení přízí a zákrutu příze. Součet těchto dvou odporů se nazývá celkový odpor. I v tomto uskupení přízí bylo zjištěno, že celkový odpor roste se zvyšující se působící silou. Rozlišit lze dvě oblasti. Oblast nízkých deformací, kde dochází k pozvolnému růstu elektrického odporu a oblast vyšší deformací s rychlejším vzrůstem elektrického odporu.

Poslední experiment byl zaměřen na měření změny elektrického odporu řetízku vytvořeného z vodivé příze při namáhání jednoosým tahem. Řetízek byl ručně uháčkovaný. Při tahové deformaci řetízku lze výrazně pozorovat kontaktní odpor, který se snižuje v počáteční oblasti namáhání (0 – 5 N) a zapříčiňuje pokles celkového odporu. Pro upínací délku 14 cm relaxované příze byl elektrický odpor 3,9 Ω , následně klesal při deformaci tahem až na hodnotu 3,5 Ω . Postupně docházelo k pozvolnému růstu, při síle 40 N vzrostla hodnota odporu na 5 Ω .

Výsledky měření by mohly být podkladem pro vypracování senzoru tahové deformace. Díky obsahu stříbra by tato příze byla vhodná i pro lékařské účely.

SEZNAM LITERATURY

- [1] MILITKÝ, J. *Textilní vlákna: klasická a speciální*. V Liberci: Technická univerzita, 2012, 374 s. ISBN 978-80-7372-844-1.
- [2] KREJZA, K. Odpor. *Převody jednotek* [online]. [cit. 2014-02-06]. Dostupné z: <http://jednotky.elchron.cz/prevody-odpor.html>
- [3] REICHL, J. VŠETEČKA, M. Encyklopedie fyziky: Elektrický odpor vodiče, Ohmův zákon pro část pro obvodu. [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/print/241-elektricky-odpor-vodice-ohmuv-zakon-pro-cast-obvodu>
- [4] ŠAFÁŘOVÁ, V. *Textilní materiály se zvýšenou elektrickou vodivostí*. TU v Liberci, 2010. Zpráva pro výzkumné centrum TEXTIL II. Technická univerzita v Liberci.
- [5] Trhací přístroj LabTest. *Katedra oděvnictví* [online]. [cit. 2014-02-15]. Dostupné z: http://www.kod.tul.cz/predmety/OM/cvi%C4%8Den%C3%AD/TRHACKA_LAB_TEST.pdf
- [6] MILITKÝ, J. Česká hlava a svět vědy č. 7.: Inteligentní textilie – realilia, nebo fikce?. *Smart textiles*. 2003, s. 23 – 26. Dostupné z: http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/inteligentni_textilie.pdf
- [7] Zkušební trhací stroje do 3 kN: Použití zkušebního stroje LabTest. *LABORTECH* [online]. [cit. 2014-03-03]. Dostupné z: <http://www.labortech.cz/produkty/zkusebni-stroje/zkusebni-trhaci-stroje-elektromechanicke/0-3kn-stolni-provedni/>
- [8] LI, L., LIU, S., DING, F. Electromechanical analysis of length-related resistance and contact resistance of conductive knitted fabrics. *Textile Research Journal*. 2012-11-27, vol. 82, issue 20, s. 2062-2070. DOI: 10.1177/0040517512447519. Dostupné z: <http://trj.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0040517512447519>
- [9] Multimetr Agilent. In: *Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky: Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2014-03-25]. Dostupné z: <http://www.utee.feec.vutbr.cz/files/kestazeni/pristroje/34401A.pdf>
- [10] COTTET, D., et al. Electrical Characteriation of Textile Transmission Lines. *IEEE Transactions on Advanced Packing*. 2003, vol. 26, no. 2, s. 182-190.

- [11] RAMACHANDRAN, T., VIGNESWARAN, C. Design and Development of Copper Core Conductive Fabrics for Smart Textiles. *Journal of Industrial Textiles*. 2009, vol. 39, no. 1, s. 81-93.
 - [12] TAO, X. *Wearable electronics and photonics*. Cambridge: Woodhead Pub, 2005, s. 81-104. ISBN 1845690443.
 - [13] HESS, L., ŠAFÁŘOVÁ, V. 25429. *Zařízení k měření elektrického odporu délkových útvarů, zejména délkových textilních útvarů*. Praha: Úřad průmyslového vlastnictví, 2013.
 - [14] Fibers and Yarns. *Satex world of silver* [online]. 2014 [cit. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://statex.de/index.php/en/shieldex-2/produkte>
 - [15] Interní norma č. 578. *Měření elektrického odporu lineárních textilních útvarů (přízí) - stanovení délkové a hmotnostní rezistivity*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2011.
 - [16] LEDERER, J. Polyamidy. *Katedra chemie PŘF* [online]. [cit. 2014-05-08]. Dostupné z: <http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/POLYAMIDY07022013.pdf>
 - [17] ŠAFÁŘOVÁ, V. *Textilie se zvýšenou odolností vůči elektromagnetickému smogu*. Liberec, 2014. Disertační práce. Technická univerzita v Liberci.
 - [18] MILITKÝ, J., VANÍČEK, J. Vlastnosti vláken. *Katedra textilních materiálů* [online]. [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/20060106/VlastnostiVlaken-prednaska9.pdf>
 - [19] Textilní zkušebnictví II. In: *Katedra textilních materiálů TUL* [online]. [cit. 2014-04-30]. Dostupné z: <http://www.ft.tul.cz/depart/ktm/files/ZKT2dil.pdf>
 - [20] MATTMANN, C., CLEMENS, F., TRÖSTER, G. Sensor for Measuring Strain in Textile. *Sensors* [online]. 2008, vol. 8, issue 6, s. 3719-3732 [cit. 2014-04-18]. DOI: 10.3390/s8063719. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/8/6/3719/>
-

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Schematický náčrtek přípravku pro měření elektrického odporu délkových textilií [4].

Obrázek 2: Závislost elektrického odporu na upínací délce vzorku [15].

Obrázek 3: Závislost součinu elektrického odporu, počtu konců příze, jemnosti příze a konstanty na upínací délce [15].

Obrázek 4: Schematický náčrtek odpovídajícího elektrického obvodu reprezentující měření elektrického odporu délkových textilních útvarů [13]

Obrázek 5: Seskupení experimentu pro zjišťování kontaktního odporu [12].

Obrázek 6: Změna kontaktního odporu při zatížení příze [12].

Obrázek 7: Tahová křivka [19].

Obrázek 8: Pracovní diagram vláken [18].

Obrázek 9: Změna tvaru smyčky – a) smyčka v přirozeném stavu b) smyčka při prodloužení [8].

Obrázek 10: Pletená soustava – elektrický obvod představující základní očko pleteniny [17].

Obrázek 11: Logaritmická vodivost některých kovů a vodivých polymerů [12].

Obrázek 12: Závislost vodivosti na teplotě pro kovy a vodivé polymery [4].

Obrázek 13: Schéma konstrukce příze.

Obrázek 14: Příčný řez.

Obrázek 15: Podélný pohled.

Obrázek 16: Zkušební stroj – LabTest [7].

Obrázek 17: Stolní multimetr – Agilent [18].

Obrázek 18: Tahová křivka příze.

Obrázek 19: Délková rezistivita.

Obrázek 20: Délková rezistivita s vyloučením kontaktních odporů.

Obrázek 21: Schematické znázornění uskupení experimentu (a) experiment A - měření délkového odporu při napínání příze, (b) experiment B - měření kontaktního odporu příze tvořící smyčku a (c) experimentu C - měření kontaktního odporu příze v řetízku [12].

Obrázek 22: Experimentální znázornění elektromechanické analýzy [12].

Obrázek 23: Vztah mezi délkovým odporem a tahovou silou jednotlivých vodivých vláken různých délek.

Obrázek 24: Oblast nízké deformace při jednosměrném namáhání tahem.

Obrázek 25: Oblast vyšší deformace při jednosměrném namáhání tahem

Obrázek 26: Vztah deformace a elektrického odporu při jednosměrném namáhání tahem.

Obrázek 27: Schématické znázornění napínání dvou přízí ve smyčce.

Obrázek 28: Závislost mezi celkovým elektrickým odporem a silou dvou překrývajících se vodivých přízí tvořících smyčku pro tři upínací délky.

Obrázek 29: Oblast nízké deformace při měření kontaktního odporu dvou překrývajících se vodivých přízí.

Obrázek 29: Oblast nízké deformace při měření kontaktního odporu dvou překrývajících se vodivých přízí.

Obrázek 30: Závislost elektrického odporu na deformaci při měření odporu překrývajících se vodivých přízí.

Obrázek 31: Schéma háčkovaného řetízku.

Obrázek 32: Vztah mezi celkovým odporem v tahu a silou, vodivého háčkovaného řetízku o třech délkách.

Obrázek 33: Oblast nízké deformace při měření kontaktního odporu háčkovaného řetízku.

Obrázek 34: Háčkový řetízek před napínáním.

Obrázek 35: Háčkový řetízek po napínání.

Obrázek 36: Prototyp senzoru [20].

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Měrný elektrický odpor ρ [$\Omega \cdot m$] při 65 % relativní vlhkosti a 20°C [1].

Tabulka 2: Vlastnosti vybraných kovů.

Tabulka 3: Parametry vodivé příze.

Tabulka 4: Průměrné hodnoty základních charakteristik vláken.

Tabulka 5: Statistické hodnoty měření pevnosti příze.

Tabulka 6: Průměrné hodnoty odporu příze.

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Výsledky měření jemnosti vláken a pracovní křivka.

Příloha 2: Naměřené hodnoty – hodnocení elektrických vlastností příze.

Příloha 1: Výsledky měření jemnosti vláken a pracovní křivka

Vibroskop / Vibrodyn

Serial number : 000 / 000

Measurenumber: :109

Program version : V1.75



16.4.2014 14:40:06

Sample ID : Malachova

Ballen ID :

Product : Produkt2

Type :

Article :

Material :

Comment :

Operator : User User

Nominal Titer : 0 dtex

Stapel length : 0 mm

Gauge length : 10 mm

Test speed : 10 mm/min

Tension weight : 500 mg

No.	Titer dtex	Force cN	Elong. %	Ten. cN/tex	Ten/10% cN/tex	YM1% cN/tex	YM1% cN/dtex	YM1% g/den
1	8,93	31,42	21,70	35,18	13,26	247,85	24,79	28,07
2	8,93	42,54	32,00	47,64	13,65	226,95	22,70	25,71
3	8,93	37,29	32,20	41,76	12,41	242,44	24,24	27,46
4	10,43	42,78	27,90	41,02	12,79	246,88	24,69	27,96
5	8,91	39,16	29,70	43,95	12,96	239,81	23,98	27,16
6	9,13	38,59	26,90	42,27	12,92	246,99	24,70	27,97
7	9,49	41,99	30,90	44,25	12,64	247,10	24,71	27,99
8	8,33	38,63	45,40	46,37	12,77	268,91	26,89	30,46
9	9,43	24,06	18,60	25,51	12,87	201,13	20,11	22,78
10	9,65	39,30	29,70	40,73	12,27	258,03	25,80	29,23
11	8,30	35,17	26,50	42,37	13,26	201,69	20,17	22,84
12	9,32	42,71	41,00	45,83	12,61	259,66	25,97	29,41
13	8,61	36,15	29,00	41,99	13,00	278,16	27,82	31,51
14	9,37	37,51	30,90	40,03	12,17	247,07	24,71	27,98
15	9,09	40,35	33,40	44,39	12,77	235,06	23,51	26,62
16	8,76	30,35	22,40	34,65	13,37	281,39	28,14	31,87
17	8,84	40,17	34,90	45,44	12,78	266,97	26,70	30,24
18	8,51	36,98	37,40	43,45	12,60	282,02	28,20	31,94
19	9,34	40,52	40,20	43,38	12,71	258,03	25,80	29,23
20	8,82	39,69	30,90	45,00	13,24	279,48	27,95	31,65
21	9,14	40,88	38,50	44,73	12,92	230,31	23,03	26,09
22	9,63	39,27	26,60	40,78	13,24	213,91	21,39	24,23
23	8,93	39,12	31,40	43,81	13,31	275,48	27,55	31,20
24	8,86	40,59	31,40	45,81	13,84	249,44	24,94	28,25
25	9,81	37,95	31,00	38,69	11,68	206,42	20,64	23,38
26	9,39	40,10	27,50	42,71	13,43	240,15	24,01	27,20
27	9,28	37,41	32,70	40,31	11,85	215,52	21,55	24,41
28	9,45	40,68	34,50	43,05	12,46	221,16	22,12	25,05
29	8,65	38,30	34,90	44,28	12,75	250,48	25,05	28,37
30	8,77	34,48	27,20	39,32	12,81	278,22	27,82	31,51
31	9,06	36,27	28,50	40,03	12,78	272,08	27,21	30,82
32	9,06	32,78	22,90	36,18	13,61	272,26	27,23	30,84
33	8,55	37,98	36,50	44,42	12,98	211,70	21,17	23,98
34	8,21	34,84	26,00	42,44	13,17	269,18	26,92	30,49
35	7,90	32,38	26,00	40,99	13,28	257,38	25,74	29,15
36	9,13	34,95	24,20	38,28	12,61	214,13	21,41	24,25
37	9,67	40,16	35,50	41,53	11,73	174,97	17,50	19,82
38	9,44	37,45	30,40	39,67	12,21	258,47	25,85	29,28
39	8,28	36,42	31,00	43,99	12,85	237,12	23,71	26,86
40	8,47	37,89	41,70	44,73	13,38	282,76	28,28	32,03
41	8,62	37,08	28,40	43,02	12,95	272,04	27,20	30,81
42	9,53	42,22	39,70	44,30	12,76	259,39	25,94	29,38
43	9,52	38,18	25,40	40,11	12,57	231,62	23,16	26,23
44	9,25	41,07	33,90	44,40	12,27	201,62	20,16	22,84
45	9,64	41,36	30,20	42,90	12,93	266,60	26,66	30,20

Vibroskop / Vibrodyn

Serial number : 000 / 000

Measurenummer : 109

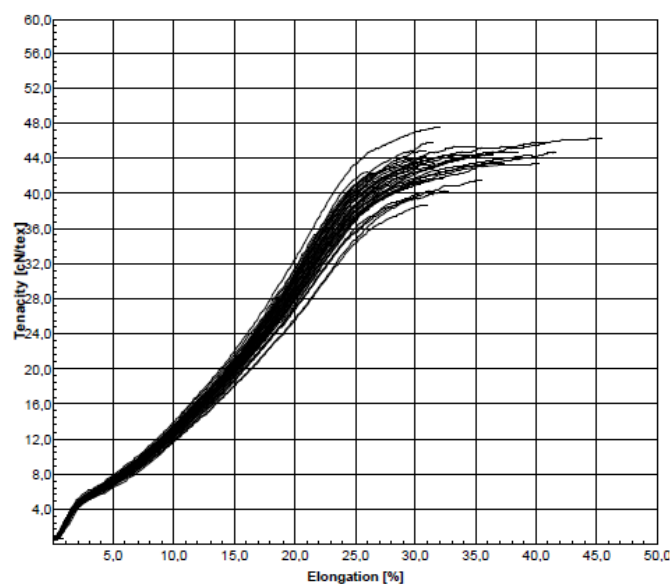
Program version : V1.75



16.4.2014 14:40:06

No.	Titer dtex	Force cN	Elong. %	Ten. cN/tex	Ten/10% cN/tex	YM1% cN/tex	YM1% cN/dtex	YM1% g/den
46	10,29	0,49	0,80	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00
47	10,29	42,85	30,90	41,64	11,88	197,86	19,79	22,41
48	8,91	38,66	31,50	43,39	12,55	244,44	24,44	27,69
49	9,89	39,20	26,90	39,64	12,07	219,92	21,99	24,91
50	9,67	41,90	31,00	43,33	12,77	249,74	24,97	28,29
Average :	9,13	37,37	30,37	41,08	12,53	239,80	23,98	27,16
Std.dev. :	0,55	6,41	6,89	6,88	1,87	43,55	4,36	4,93
CV% :	6,04	17,15	22,67	16,76	14,95	18,16	18,16	18,16
Maximum :	10,43	42,85	45,40	47,64	13,84	282,76	28,28	32,03
Minimum :	7,90	0,49	0,80	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00
Span width :	2,53	42,36	44,60	47,16	13,84	282,76	28,28	32,03
Confid- :	8,97	35,52	28,39	39,10	11,99	227,23	22,72	25,74
Intervall :	9,29	39,21	32,36	43,07	13,07	252,37	25,24	28,58

T / E Line



Příloha 2: Naměřené hodnoty – hodnocení elektrických vlastností příze

upínací délka 100 mm		upínací délka 200 mm		upínací délka 300 mm	
počet měření	hodnota měření [W]	počet měření	hodnota měření [W]	počet měření	hodnota měření [W]
18	7,974	5	11,444	17	15,789
15	8,07	4	11,493	18	15,874
19	8,082	1	11,64	19	16,022
16	8,112	2	11,711	16	16,061
17	8,25	3	11,745	20	16,211
9	8,4	15	13,775	10	16,293
11	8,4	14	13,821	11	16,346
13	8,407	20	13,932	12	16,348
12	8,421	13	13,945	14	16,527
14	8,5	16	14,014	13	16,558
10	8,9	19	14,04	15	16,558
20	8,988	17	14,059	9	16,586
2	10,773	18	14,059	8	16,667
4	10,78	9	14,101	7	17,357
3	10,787	12	14,129	6	17,467
7	10,802	10	14,192	5	17,606
8	10,87	8	14,21	4	17,706
6	10,93	11	14,264	2	18,06
1	10,937	6	14,276	3	18,112
5	11,001	7	14,304	1	18,172
součet	187,384	součet	269,154	součet	336,32
průměr měření	9,3692	průměr měření	13,4577	průměr měření	16,816
medián	8,7	medián	14,027	medián	16,558